北海盆地石油地质特征与勘探实践

叶德燎　易大同　编译

石油工业出版社

内 容 提 要

北海盆地作为一个整体，石油产量排在世界的第四位，天然气产量居世界第三位。本书通过对北海盆地的勘探发展史、油气地质背景、油源岩、油气运移、油气远景区及盆地内各油气田的详细剖析，从多方面、多角度综合分析了北海盆地，期望有助于更深刻地认识我国类似的含油气盆地，提高勘探成功率。

本书可供广大地质学、石油勘探开发科技工作者及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

北海盆地石油地质特征与勘探实践/叶德燎，易大同编译.
北京：石油工业出版社，2004.2
ISBN 7－5021－4561－3

Ⅰ.北…
Ⅱ.叶…
Ⅲ.①北海－含油气盆地－石油天然气地质－特征
②北海－含油气盆地－油气勘探
Ⅳ.P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 003832 号

石油工业出版社出版
(100011　北京安定门外安华里二区一号楼)
北京乘设伟业科技排版中心排版
北京密云华都印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行
*
787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 403 千字 印 1—500
2004 年 2 月北京第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷
ISBN 7－5021－4561－3/TE・3191
定价：43.00 元

前　　言

古云："他山之石，可以攻玉"。只有了解了世界各地区，特别是与本地区相类似的油气盆地，才能更经济、有效地开展本地区的油气勘探开发工作。追溯百余年来油气勘探开发史，每当有一个新地区、新层系或新远景圈闭的发现，无不给其他类似地区、类似层系和类似远景圈闭的勘探带来活力，从而导致一系列新的发现。

北海盆地已知可采储量和资源量相加估计为 7886.625×10^8bbl 油当量，其中 60%为原油，33.6%为天然气，6.4%为凝析油和天然气液（Dafter，2003）。目前，只有 339.822×10^8bbl 油当量已被采出，而绝大部分的油气仍然隐藏在地下，有待进一步的勘探开发。北海盆地作为一个整体，石油产量排在世界的第四位，仅次于沙特阿拉伯、美国和俄罗斯；天然气产量居世界第三位，排在美国和俄罗斯之后。北海盆地的勘探历程并不是一帆风顺的，也有过反复。北海盆地是一个复杂的含油气盆地，对它的认识，是随着勘探开发工作的深入而逐步加深的。伴随着技术的进步，油气勘探不断取得成功。1992 年北海盆地已停止二维地震勘探，取而代之的是三维地震。目前已广泛采用四维地震，以获取有关油藏分布及特征的更清晰的图像。对北海盆地石油地质特征的了解，将有助于更深刻地认识我国类似的含油气盆地，提高勘探成功率。

本书的编译工作由叶德燎和易大同共同完成。叶德燎主要负责外文资料的翻译和整理，易大同负责文献资料的收集、整理和成文。文稿完成后，安作相对稿件进行了审阅和修改，最后由叶德燎进行定稿。

本书成文过程中，王惠娟同志协助整理了大量资料，付出了许多的精力和汗水；潘文蕾、翟常博同志帮助清绘了本书所有的图件；黄继文、贾存善、徐文明、蔡毅同志给予了许多帮助；中国石化石油勘探开发研究院无锡实验地质研究所提供了出版经费。在此表示最诚挚的谢意！

目　　录

第一章　概　　论

北海是 20 世纪 60 年代中期开始发展起来的最活跃的海上油气勘探开发区之一，虽然北海环境恶劣，油气勘探开发成本高，但是由于具有良好的石油地质条件，丰富的石油储量，高的油气勘探成功率，吸引了大批石油公司来此进行油气勘探开发，使北海发展成为世界海洋的主要产油气区之一。

北海周围的国家有英国、挪威、丹麦、荷兰和德国等，那里纬度较高，常年气候恶劣，变化无常，一年内平均只有 40 多天好天气。

北海北邻挪威海，西北以设德兰群岛为界，南至多佛尔海峡，面积约 $57.5\times10^4 km^2$。根据 1958 年日内瓦大陆架会议确定的原则，北海周围各国经过协商，确定了一系列双边协定，按中线原则划分北海海域，确定了各国之间的海区面积，分别为：英国约占 46%、挪威占 27%、荷兰为 10%、丹麦为 9%、德国 7%、剩余的 1%归比利时和法国。北海北部的范围，包括了英国、挪威、丹麦和德国的海域，面积约 $35\times10^4 km^2$。其中英国约 $15\times10^4 km^2$、挪威 $13.1\times10^4 km^2$、丹麦 $5.6\times10^4 km^2$、德国 $1\times10^4 km^2$。按地理坐标来说，其南界在北纬 56°线附近，北界在北纬 62°线，东界在东经 7°线附近，西界在西经 3°线。在地质构造上，以北海中部高地和林克宾芬高地为界，在高地北侧属北海北部地区，以产油为主，也有一些气田。以下把北海北部地区简称为“北海油田区”。

北海主要油气田多集中分布在沿盆地轴线附近，已发现的 40 多个油气田，几乎 80%以上集中分布在沿盆地轴线 80～100km 宽的范围内，正好在近南北和北北西向的北海中央地堑和维京地堑区。

北海油气的开发，是海上石油工业在 20 世纪 70 年代的一项重大成就。从 1959 年在荷兰北部发现格罗宁根大气田开始，到 1969 年在挪威海域发现埃科菲斯克大油田，历时 10 年。北海可能有石油前景，早在 50 年代就有所披露，但直到英国石油公司在美国阿拉斯加发现大量石油以后，才回过头来在自己的家门口——北海盆地着手进行油气勘探与开发。

为了开发北海油田，英国使用了世界 66 家银行贷款，采用了美、法、德、日等国最为先进的技术成就。

从 1963 年开始，石油工业界开展了有史以来最有抱负的工作之一——开发北海油田。各种各样的钻井和生产平台被拖到了北海。英国与挪威两国就在北海以每座耗资 20 亿美元的代价建造了一个又一个的现代化平台。实际上这是一座座海上工业城市，是油田的神经中枢。这种平台带有 3 个水平甲板，有可供 120 人使用的休息室，一个直升飞机甲板。供该平台使用的直升飞机随时处于待命状态，以便进行钻井平台之间的特殊联系和紧急状态下的疏散工作；它有由高度现代化仪器设备装备并由精通业务的工作人员操作的中心控制室，在这里通过专门的卫星通讯线路与英国、挪威两国保持着密切的联系，并用无线电话传递各钻井平台之间的信息。紧急状态下，控制室还可以对各个钻井平台全部操作工作进行遥控。

开发北海油田的人们深知，海上钻井难，但海底铺设管线更难。从号称欧洲油都的苏格兰北部滨海城市阿伯丁到最近的钻井平台间的距离至少有 140km，一般都在 300km 左右，区域水深都大于 150 m。为了确定最合适的铺设线路，对北海有关海域底部一米一米地进行了勘

探。在每次工作中，必须动用二艘布线驳船，一艘埋线驳船，一艘潜水供给船，一艘负责检验的微型潜水艇和它们的供给船。此外，还有由供应船，拖船管线运输船组成的约 60 艘的小船队来保证施工的进行，从弗里格大气田向英国本土铺设 360km 的管线，耗时近一年。英国壳牌石油公司铺设 1km 长的海底管线要投资 1 百万英磅。

随着科学的发展，各种现代化的技术也不断地被引入北海油田的开发建设中，例如卫星导航和平台的定位、卫星通讯、高度自动化的电脑设施、精确的水下信息传递系统。法国石油公司还在北海油田首次成功地使用了“亮点技术”。

北海油田的开发带来了巨大的经济收益。70 年代以前的英国，除了在苏格兰有小规模的油页岩开采提炼工业以外，基本上没有石油。到了 1975 年，天然气产量达 $136\times10^{8}m^{3}$，1980 年实现了能源自给自足，1985 年石油产量达到了 $1285\times10^{8}t$，跃居世界第五位。挪威也由此成为石油自给有余，并有大量出口的国家。北海油田目前已成为世界 10 大产油区之一。

北海盆地有两个特点：一是其基底的破碎程度高，二是热流值高。北海盆地由于拉张断陷作用，形成了许多地堑，包括有维京地堑、中央地堑、北荷兰地堑、福蒂斯地堑、挪威地堑等。在这些地堑中，地壳厚度明显变薄。因此，具有较高的地温梯度（2.7～3.4℃/100m）。在这些深地堑中沉积了厚度达 10 km 的二叠纪、三叠纪、侏罗纪和早白垩世的沉积物，并被晚白垩世、早第三纪和晚第三纪的厚达 3～4 km 的平缓盖层覆盖。因而构成了由裂谷的断块运动及上覆岩层的差异压实作用形成储油圈闭的构造带。侏罗系是主要的生油岩，侏罗系浅海相砂岩、古新世白垩岩及古新世—始新世水下冲积扇砂岩是主要的储油层。上石炭统的煤系是天然气的主要来源，二叠系赤底砂岩是主要的储气层。经测定，北海盆地主要的生油层其平均总有机质含量高达 4.58%，干酪根为Ⅱ型，根据现代油气成因理论（油气形成不仅取决于生油岩层中有机质的含量和质量，而且取决于生油岩层的沉降动力学特征和受热强度），可以乐观的认为，北海盆地由于具有上述良好的地质和有机质条件，它必定具有高的含油气性。据 Goff(1983) 计算，北海盆地的油气聚集率可达 20%～30%。

北海石油产量主要来自英国和挪威，约占北海石油总产量的 97%以上，1985 年北海石油产量达到最高峰，年产石油 $1.71\times10^{8}t$，占世界海洋石油年产量的 22%。此后，由于英国北海的第一代大油田如福蒂斯、尼尼安、布伦特的产量开始下降，虽然每年都有新的油田被发现和开发，并且挪威同时石油产量仍继续上升，但是由于弥补不了这些大油田产量的下降，因而使北海的石油年产量从 1986 年开始有所下降，1990 年下降到 $1.55\times10^{8}t$，1995 年为 $1.35\sim1.5\times10^{8}t$。到 2000 年将可能降至 $1.10\sim1.4\times10^{8}t$。

尽管北海油田区的自然条件差，技术上困难多，风险大，但开发速度还是比较快的。从 1975 年英国正式产油算起，5 年时间由 $200\times10^{4}t$ 增加到将近 $1\times10^{8}t$。从 60 年代中期开始的探索，仅仅 20 多年的时间，在英国水域就发现了 50 多个重要的油气田。在挪威、丹麦、荷兰等国家水域中也有相当数目的油气田发现。

为了取得对北海北部地质构造和油气前景的新资料，从 60 年中期开始到 80 年代前期布置了成千上万千米的地震测线，打了 1500 多口探井，其中英国水域就打了 900 多口探井。

当时（1985 年）人们估计，英国海域石油可采储量为 $22\sim44\times10^{8}t$，而至 1985 年累计产油为 $6.92\times10^{8}t$，剩余可采储量为 $18.6\times10^{8}t$，若从 $44\times10^{8}t$ 计，还有一半的储量有待去发现。挪威海域估计有 $40\sim50\times10^{8}t$ 油当量，已证实的可采储量为 $11.3\times10^{8}t$ 油当量，已累计产出 $2.2\times10^{8}t$ 油当量，因此，还有 70%的储量没有发现。

北海油田的发现和开发，支持了西欧经济的发展，特别是给英国经济带来了复苏。在

1974 年以前，英国仅有几个陆地上的小油田，全国石油年产量不足 $20 \times 10^4 t$，自给率不超过 0.5%。随着北海石油的开发，石油自给程度大幅度提高，到 1981 年已自给有余。石油自给使英国经济卸掉了沉重的负担。石油工业已经成为英国经济的重要支柱。英国政府的油、气收入（包括矿区使用费、石油收益税、公司所得税）1981 年已达 60 亿英镑（折合 132 亿美元），1985 年突破 100 亿英镑（折合 220 亿美元）。

第二章　勘探发展简史

北海油气勘探开发从20世纪60年代起步。1963年丹麦首先颁发了开放北海陆架海域的第一批勘探许可证。1964年德国也相继颁发了北海所属海域油气勘探许可证,并于1965年首先开展钻探,发现了一个无开采价值的气藏。随后,英国石油公司在北海南部区发现了第一个西索尔气田,1966年相继又发现了3个大气田。直到1969年,菲利浦石油公司在北海发现了第一个商业性油田——埃科菲斯克。到70年代,随着海洋钻井装置建造业的迅速发展,北海油田的勘探活动进入高潮。相继进入北海进行油气钻探的公司有几十家。从1970年开始,不断有新的重大发现。尤其是从1975年开始,是北海历年来油气勘探成功率最高的一年,共发现油气田20多个。至1982年底,北海证实可采石油储量约为46×10^8t,潜在的可采储量估计有$66\sim100\times10^8$t。目前,北海共发现了100多个油气田。北海作为一个新兴的大型海上含油气盆地早已为世界石油界所瞩目,但其石油勘探和开发历史是十分曲折的,概括起来可划分为如下几个阶段。

一、1964年以前

长时期来一般人认为西欧在地质上不是含油远景很好的地区,固而,对北海含油气远景也持悲观态度。直到1959年,发现了格罗宁根大气田,它的产层是赤底统,可采储量为$16500\times10^8m^3$,才引起人们对北海油气的兴趣,推测北海海底具有类似的油气地质条件,从而促进了各国先后开展北海的勘探。从1959年开始,平均每年钻井20口,经4年时间没有发现一个商业性油田,因而使人们对北海的勘探热情严重下降。当时的工作重点仅局限在北海南部的近岸地区。

二、1964—1970年大规模勘探时期

1964年各有关国家对北海辖区范围的划定,促进了北海的油气勘探,特别是英国石油公司在一片悲观情绪中于1964年底在北海南部开始上钻井,次年发现了英国海上的第一个气田——西索尔气田,接着又发现了一些大气田,为向自然条件更差的北海北部开展勘探作了资料上的和心理上的准备。当英国石油公司于1969年11月在英国海区发现了第一个油田——蒙特罗斯油田之后,挪威海域菲利浦集团也随后在一口探井的3046m深度发现了200m厚的油层,测试日产油1300t,取名为埃科菲斯克,证实可采储量1.4×10^8t。它的发现是北海北部石油勘探的重要里程碑,告诉人们北海的油气资源是丰富的,从此北海北部的石油勘探进入了一个大发展的新时期。

在此以前,北海北部地区的其他周围国家,也在各自的海域中以中北海降起北部的下第三系为勘探目标,第一批探井中如丹麦1966年发现Aune非商业性油流,1968年发现Roar和Tyra的气以及1967年挪威水域发现瓦尔霍尔(Valhal)的油。然而,这些发现都太小,不足以作为早期开发的根据。

埃克菲斯克大油田的发现,使某些在以前的石油勘探工作中很少成功的英国公司重新转回来参加北海北部的石油勘探。这一时期英国北海海域的钻探,主要是第一和第二轮招标的

许可范围内，大多在北纬 55°～58°的北部区，目的层是下第三系和白垩系，构造上集中于中央地堑，有两个发现明显地改变了几年勘探中的受挫情绪。这两个发现是：即 BP 公司福蒂斯油田，（在第 40 号井下第三系砂岩中发现 118m 厚的油层，经测试每天自喷 750m^3，含微量气）及奥克（Auk）油田（每天产轻质低硫原油 740m^3，原油来自角砾岩裂隙和二叠系藻石灰岩），这两处发现更证实了原有的假设，石油的生成很可能是中央地堑区域的中生界与第三系的地层。从 40 号井中获取的大量岩心资料，对预测古新统砂岩性质和可能分布，提供了有价值的资料。

菲利浦公司 1970 年发现的约瑟芬（Josephine）油田是对北海北部地区侏罗系砂岩中石油的首次验证，在井深 3600m 之下薄层砂岩中获得了每天 128m^3 的产量。

三、1971—1976 年全面勘探和大发现阶段

埃克菲斯克、福蒂斯和约瑟芬 3 个油田的发现，导致在中央地堑区内的白垩系储层中发现了一系列的油田。并使英国在 1970 年的第 3 轮招标的许可范围向北部发展，引起了强烈的石油勘探的兴趣。直到 1971 年在北部 211/29 区块的布伦特构造上，二口井进行了对侏罗系含油砂岩的测试，日产 1040m^3 的密度为 38°API 的油和 1550ft^3 的天然气，是一个具有气顶的油藏。巨大的布伦特油田（$350\times10^9m^3$ 储量）的发现，对英属海区以至整个北海北部的开发都有着深远的影响，导致了年底第 4 轮招标的热潮。在以后几年中，北海北部出现激动人心的连续发现，那里已证明有商业价值的 8 个大油田，都属于布伦特类型的“潜伏高断块”圈闭。斯坦特福约尔德即国家湾油田（Statfjord）和斯莱普纳气田（Sleipner），经钻井证实在早白垩世粘土之下为含丰富有机质的启莫里阶（Kimmeridge）粘土，是重要的油气源岩。与此同时，在中部的默里湾盆地圈定了两个高产的大油田——1972 年发现的派珀（Piper）和 1974 年发现的克莱莫尔（Claymore）油田。

这些发现和多数钻探成果表明，侏罗系中含有更有价值的区域储集层和油源层。斯坦特福约尔德和布伦特砂岩为中和下侏罗统的浅水沉积，所代表的是海退型沉积，具有区域的延伸性。因而存在中侏罗统的北海北部大多数地区就很自然地能找到这些砂岩。这个观点通过广泛的勘探得到进一步证实。

派珀油田的发现，使人们注意到上侏罗统中的储油层。两年后在北海的北端又发现了马格努斯（Magnus）油田，在启莫里阶的深水相油源岩沉积中发现了含油砂岩，但当时还没有人预测到该储油层的重要意义。这主要是由于启莫里阶中的碎屑岩层被认为是没有足够（最低所需）的孔隙性和渗透性的储层，更没有认识到它是一个区域性含油层。1975 年在维京地堑南部发现了布莱（Brae）油田，从而对上侏罗统储层的商业开发价值有了进一步的认识。在布莱油田勘探过程中一个重大的成功是发现含油最大厚度为 450m 的砾岩层和砂层，被认为是一组联合扇，其中存在着侧向断裂，说明在台地和地堑之间相对高的地势起伏的位置上，都含有上侏罗统碎屑岩的展布。同年，在更南面的富尔马（Fulmar）钻井中找到了含油的上侏罗统砂岩。与此同时，下第三系中也有许多油气发现如 Bressay 等，但比起侏罗系来相对差些。

四、1977 年以后的勘探概况

1977 年以来，勘探开发活动仍然很活跃，在北海北部地区的主要勘探目标仍然是上中侏罗统，但对其他的目的层，如古生界、白垩系、古新统和始新统，仍有一定的兴趣，因而，在某些地区仍取得了可观的勘探效果。但经过一段高峰大型油气田集中发现期以后，这个阶段的主要特点是发现相对较小。

这一阶段的另一特点是勘探开发工作更加困难了。上侏罗统圈闭的地震显示已不那么明显可辨。大的地垒、倾斜断块、上覆构造和盐刺穿经前期勘探，已有许多发现，剩下的更加不明显。在此期间维京地堑南部以上侏罗统布莱油田类型的远景目标而富有成效的，有托尼(Toni)油田和蒂法尼(Tiffany)油田。更重要的发现是在挪威海域，发现了上侏罗统的特罗尔(Troll)大油气田和中侏罗统的古尔法克斯(Gullfaks)和奥塞贝格(Oseberg)及斯诺里(Snorre)等大油田。这也许与挪威发出招标区块较晚有关。

在中央地堑的阿盖尔(Argyll)油田附近，Homilfon 公司成功地圈定了一批小断层圈闭，在侏罗系砂岩中于 1981 年发现了都坎(Duncan)和东都坎(East Duncan)油田。另外，在默里湾有限的区域内，证实了下白垩统砂岩沉积中亦含有烃类聚集，如 1980 年发现的北克莱莫尔油田。

第三系的开发集中在设得兰高地的边缘，在那里原油的密度大于英国北海的其他地区的原油。在中央地堑也有若干第三系的油层的发现，菲利浦公司发现的 Joanue 就是其中之一。

对于石炭系和泥盆系或更深更老的对象，勘探研究了解很少，也许未来有可能会更多注意。

上述各阶段所取得的发现，都与地震勘探方法的进步有关。在这一方面，向三维发展趋势是引人注目的，随着发现和钻井的增多，三维地震对确切地解释构造和地层的重要作用更为明显，对解释分析储油构造的地层组成也起着重要的作用。

第三章　盆地油气地质背景

北部北海地区的大量地质和地球物理资料表明，它经历的演化历史形成了一幅复杂的地质格局。

盆地基底主要由加里东期褶皱的变质岩系组成，仅在盆地以东和以西为前寒武纪结晶基底。从传统的观点看来，它是在加里东期形成的年轻地台上发育起来的台向斜盆地。新全球构造的观点认为，它是西北欧克拉通内的一个大陆型裂谷盆地或称衰退的裂谷盆地。

第一节　构造格架及其演变

在加里东期基底之上沉积了泥盆纪—石炭纪—二叠纪的地层，构成了晚古生代的盆地，或称二叠纪盆地，又经历了三叠纪、侏罗纪、白垩纪、第三纪的漫长地质演化过程形成了第三纪的沉积盆地，这两套沉积盆地，构成了区内油气勘探的多层系，多目标的显著特点。

根据地质历史的发展和构造特点，该区可划分出一系列正向、负向构造单元，正向单元有：a)中北海隆起；b)林克宾芬隆起；c)东设得兰台地等。负向单元有：a)中央地堑；b)维京地堑；c)福蒂斯坳陷(盆地)；d)默里湾坳陷(盆地)；e)西挪威坳陷或称挪威—丹麦坳陷(盆地)。

根据该区深部物探资料解释，发现了许多复杂的侵蚀和沉积背景。说明其在加里东期基底上发育的晚古生代、中生代和新生代的沉积层序都有缺失。在空间分布上，岩相和厚度变化等方面都有明显的差异。虽然有着不同的沉降背景，但它们的成因却紧密相关。

盆地除南缘外，其周围被变形较早岩石所组成的隆起所围绕。在盆地中间有贯穿南北向的地堑切割盆地轴和隆起，从构造影响的油气聚集来说，最重要的属锯齿状的维京和中央地堑系。维京地堑在该盆地内分隔了芬诺—斯堪的那隆起(含波罗的地盾)和设得兰地台；而中央地堑除切割盆地外并直插中北海隆起。

一、不同时期的演变概况

该地区地质演变最重要的事件，以地质时代的顺序用略图(图 3—1)，重点的表示出来。

在早古生代末期，该区由于受加里东造山作用的影响发生变形，形成一组巨大山系(图3—1a—c)，到晚石炭世(图 3—1e)由于古特提斯洋的关闭，形成了超级潘基亚大陆，才初步明确了北北海盆地的南部边界。在二叠纪和三叠纪时期，由于继续拉张使维京地堑切穿整个盆地(图 3—1f)，使维京和中央地堑裂谷系在本区构造历史发展上起着重要作用。从三叠纪初期开始快速沉降，晚侏罗世到早白垩世构造发展达到高潮，其活动的持续性是使潘基亚超级大陆缓慢解体成劳亚和冈瓦纳两大陆的过程相适应的；也就是说该区地堑的发育是与北大西洋的海底扩张把劳亚大陆分离成北美和欧亚两大陆的过程相连系的(表 3—1)，扩张初期是沿着罗科尔(Rockall)海槽开始的(图 3—1g)，到了第三纪早期才发展成现今的大洋轴(图 3—1h)。在这次运动中由于复杂的拉张作用形成了一些复杂现象，可从北大西洋区三叠纪时期的裂谷图中表示出来(图 3—2)。这些就是该区大地构造演化的基本模式和特征。

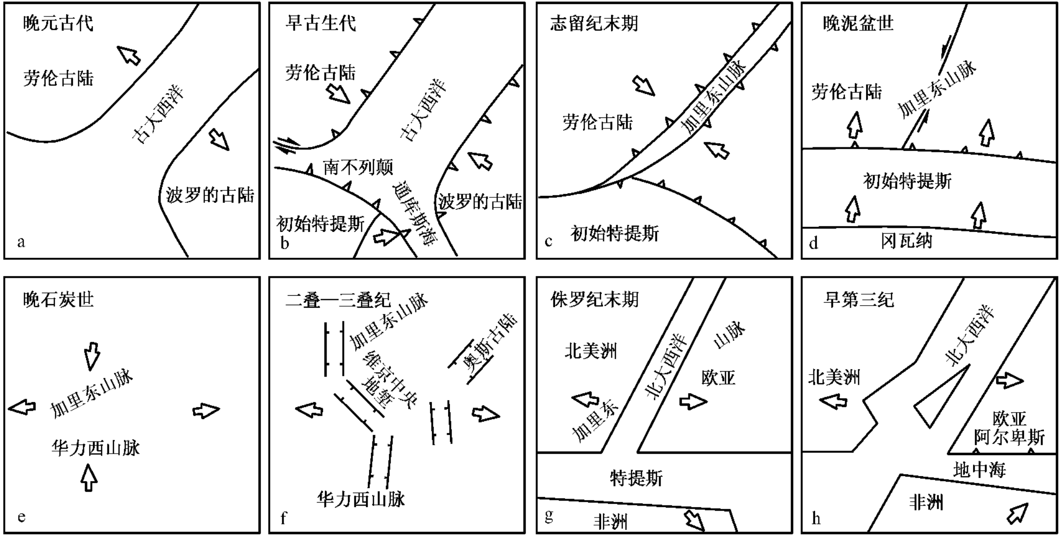


图 3—1　晚元古代—早第三纪北海地区板块相对运动示意图

表 3—1　大西洋的简单演变及北海晚加里东构造运动

时代		区域事件：特提斯	区域事件：大西洋	北海：北部	北海：默里湾	北海：中部	北海：南部
新生代	中新统		现代扩张	覆于地堑体系上的区域沉降中心			
	渐新统	阿尔卑斯造山运动					
	始新统		台地玄武岩		默里湾隆起 苏格兰高地	中央地堑断层复活；丹麦海湾旋转	蔡希斯坦刺穿作用 NW-SE走向的 下盆地转变
	古新统		罗科尔海槽扩张 北延伸至 挪威-格林兰海	西设得兰隆起 晚断裂作用幕			
白垩纪	晚期	板块碰撞 特提斯海逐渐关闭；伊比利亚旋转				中央地堑沉降；丹麦海湾喷出岩	
	早期		海底扩张 伊比利亚重新沉降 大西洋中部扩张开始	北维京隆起 主要断裂作用幕	默里湾内恰似速沉降 东部火山活动	地堑的形成主要 阶段和塌陷隆起 和火山活动极限	蔡希斯坦刺穿作用 持续侵蚀底板 快速沉降 构造扭动和断裂
侏罗纪	晚期	特提斯海海底扩张				早蔡希斯坦刺穿作用	
	中期						三叠系400m
	早期						
三叠纪		裂谷作用幕	大西洋中部裂谷	西北欧盆地发育/地堑体系 蔡希斯坦世漫溢海平面下的盆地			
二叠纪	晚期				默里湾沉降	北部和南部二叠纪盆地开始沉降 晚赤底统火山岩开始喷发 盆地底板转变为右旋断裂带	
	早期	海西晚期的构造运动		东苏格兰和斯堪 尼亚提火山岩脉群			
石炭纪	斯蒂芬						华力西前渊 石炭系2500m
	威斯特伐利亚	华力西早期碰撞褶皱 (指欧洲)	挪威-格林兰海裂谷	北不列颠岛裂开			
	纳缪尔	华力西造山运动 板块碰撞		苏格兰高地重新隆起			
	狄南		北大西洋破裂样式 开始				
泥盆纪	晚期	特提斯海关闭					弧后裂谷
	中期		大格林走向滑移断层 延伸至北大西洋				
	早期			苏格兰高地 花岗岩侵入	奥克尼盆地火山 奥克尼盆地沉降	奥克和阿盖尔 海相灰岩 南部苏格兰火山岩	湖区花岗岩

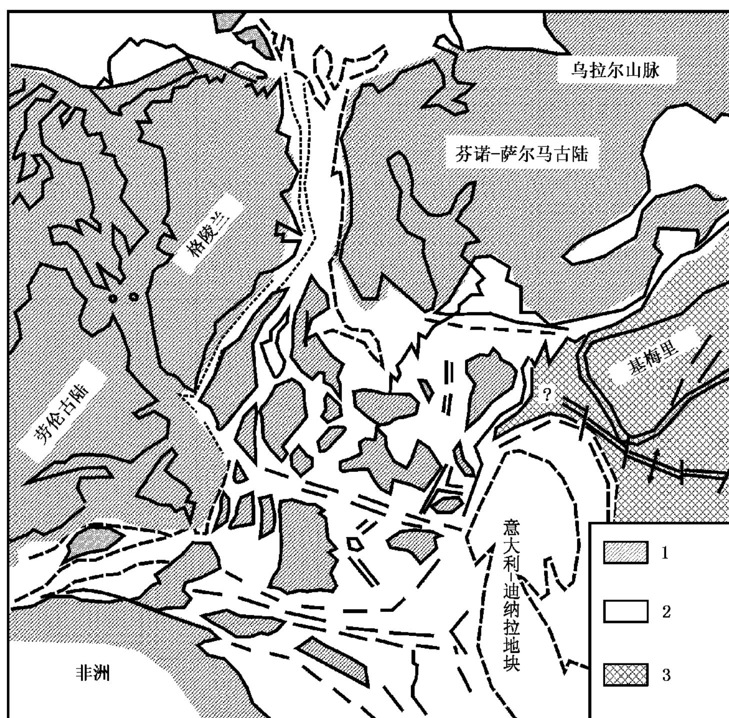


图 3—2　北大西洋地区三叠纪时期的裂谷系统图

（早期历史复原图据 Ziegler，1982）

1—地壳上升区；2—沉积盆地；3—洋盆

从上面的简略叙述就可以看出，该区经历了一个复杂的地质演变过程，成为不同构造区及沉积盆地的一部分。概括起来，可以把该盆地的发育划分如下几个阶段。

1. 前寒武纪的历史

关于这一段的演化历史，所知甚少。从英国、斯堪的那维亚、格林兰和加拿大的研究中获得的一些资料，许多认识仍属推断，尽管如此，英伦三岛仍不失为我们识别该地区演化历史的最好的地方。

除在赫布里底地盆地边缘暴露出来的太古代刘易斯群（Lewision）片麻岩外，苏格兰高原（Scottish Highlands）上的变质岩自下而上可划分成两大岩石组合：莫因组（Moine）和达拉德组（Daliadians）。莫因组岩石仅出露于西北部（Highland 和 Grampians 的西北），并在达拉德组地层覆盖（主要分布在 Highlands 边界断层附近），其中还发现包括早期洋壳组成的火成岩，如安斯特岛（Vnst）；设得兰（Shetland），莫文（Morven）和阿伯丁洲（Aberdeen Shire）等基性岩类。

目前所见加里东造山带是多次地质事件的结果，它也许与 10 亿年前的地质事件有关。格林维尔（Grenvillian）造山带（约 10.4 亿年）是一次拉张运动，这可从大陆上的太古代刘易斯群所构成的结晶基底中有地堑形成得到明显的证明，其中充填有最早的托里东（Torridonian）群的陆相沉积物（Stewarf，1981）。在莫因冲断带的西侧赫布里底地台的边缘，这些古老的沉积物并未变质。然而，在冲断带的东侧，它们与其下的格林维尔基底（约 7.4 亿年）一起变质了，称摩拉维亚（Morovian）事件；到了晚寒武世和早奥陶世，与其上覆的达拉德组地层再次变质（Johnson 等，1979；Watson 和 Dunning，1979）。

2. 早古生代的发展

在古大西洋(Iapefus)中的加里东褶皱带中沉积了许多海相地层,在整个早古生代,古大西洋分隔了波罗的(Baltic)劳亚地盾,当时大洋破裂的位置可能是在当今的苏格兰的南缘米德兰山谷。Anderland(1982)提出该洋的扩张前奏可以米德兰山谷之北的 Ensialic 盆地中的 Tayvallich 火山岩喷发为代表(6 亿年,晚前寒武纪或早寒武世)。沿着劳亚大陆边缘形成的这个狭窄盆地,就成为高原边缘杂岩体上的早古生代海相沉积区,它们后来又发生变质成为达拉德组中的一部分(Henderson 和 Robertson,1982)。这套地层中伴生有蛇纹岩、辉长岩和细碧岩等可能属大洋型地壳的特征。但直到今天,该区裂谷的形成是否与古大西洋的扩张有关,或者为后期大洋关闭形成的弧后盆地,这一问题尚未解决。

世界洋中脊体积的增加,引起老莫因和达拉德组陆相层系之后的寒武纪海侵,这个海侵在波罗的地区可以看到,例如那里沉积有尚未变形的矾土(Alum)油页岩,可惜在丹麦这套岩石过成熟(Thomsen 等,1983)。

劳伦板块是构成苏格兰的一部分,它曾位于赤道的附近,因而在这里曾发生碳酸盐岩台地的沉积。在中寒武世以前它是重要的沉积盆地区域。早为人们熟知的英国斯科特地区亦属赤道型的寒武纪—奥陶纪大陆架碳酸盐岩沉积,其中有相当数量的生物群德内斯(Durnes)石灰岩沉积,它们的岩性非常类似于宾夕法尼亚的毕克曼顿(Beekmantwon)石灰岩(属下奥陶世),而不同于现今相邻的威尔士(Wales)层系。Cocks 和 Fortey(1982)运用气候影响浅海中浮游生物和深水中底栖生物组合的思路,重塑了古大西洋随时间变化的关系(图 3－3)。劳伦群分布在东部沿岸,包括苏格兰的北部,在挪威的特隆赫姆(Trondheim)地区发现有两个很高的推覆构造,它应该是在早奥陶世时位于近赤道期间形成的。其余的斯堪的那维亚、威尔士和英国的部分大约位于南纬 40°～60°(图 3－3A)。此外,用生物组合标志来分区,又进一步发现斯堪的那维亚和英国当时是为深海区所隔开的,这个深海称为通古斯特(Tornguist)海,相当于德国—波兰的加里东褶皱带的缝合线(Zieglar,1982),通古斯特海在奥陶纪关闭(图 3－3B)。

3. 加里东造山运动

从晚元古代到早古生代的沉积和火山岩,经过 6 亿年的演变,多次发生变形和变质,如早已注意到的苏格兰高原上托里东沉积在 7.4 亿年(Morarian 事件)发生变质作用,形成莫因系。在晚寒武世至早奥陶世的格兰扁(Gram－Pian)剧烈造山期里,导致了达拉德组和早已变形的莫因组发生强烈的褶皱和变质作用,并有许多花岗岩侵入,如在高原东北较老的花岗岩(Tohnstone,1966;Bradburg 等,1976)。随着高原的隆起,浊流扇向南分布在古大西洋上。到了晚奥陶世和志留纪,这些浊流扇随着板块向北俯冲,因而产生一系列叠瓦状构造和高地南缘的增生楔。这也正是古大西洋最终关闭的时候。

似乎在古大西洋关闭的不同时期曾产生北西向和南东向的两种消减作用,在不列颠群岛范围内,这条关闭的缝合界线从西爱尔兰的香农(Shannon)河口经索尔威湾(Solway Firth)进入北东向延伸的诺森伯兰(Northnumber－land)海槽。这条缝合线表现出的平直和巨大的破碎现象,表明它是在大洋西侧缓慢的汇聚, 并有走向滑动的显示。这条缝合线延到北部北海中的情况尚不清楚。

通古斯(Tornguist)海的关闭并未引起大的褶皱带。有人认为古大西洋在英国和斯堪的纳维亚的部分,俯冲潜没的几何形态,竟使通古斯海关闭,造成波罗的和英国板块歪斜收敛的结果。而其他的微型陆块则封闭在东欧和中欧的加里东造山带中。

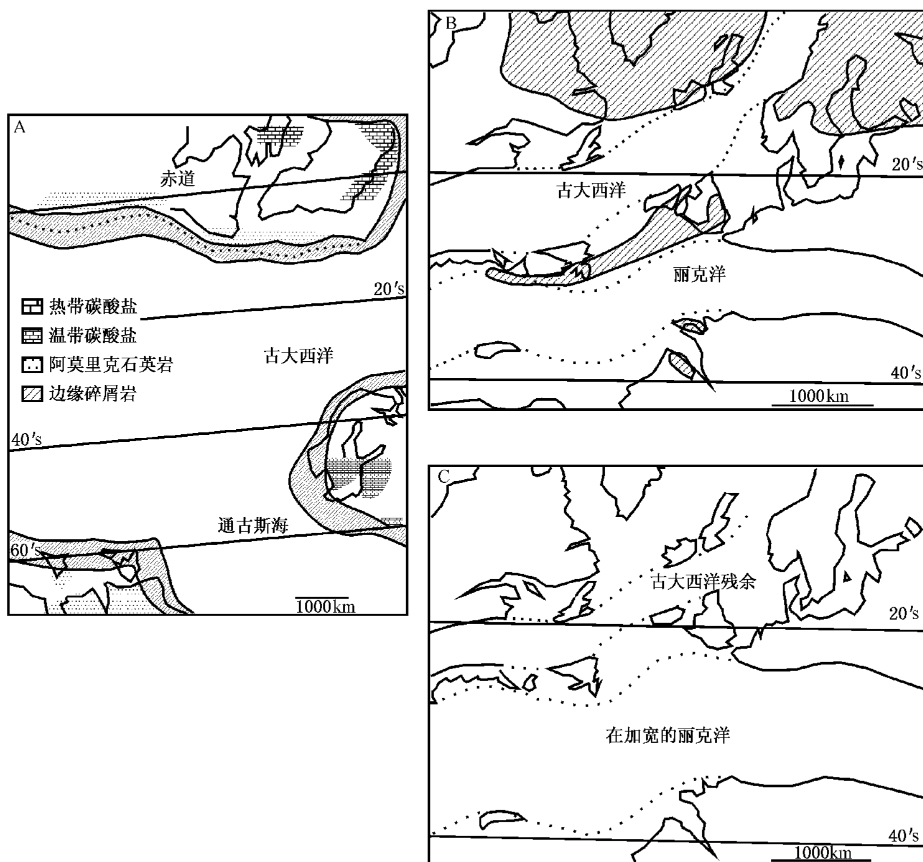


图 3—3　古生代时期古大西洋演化的 3 个阶段

A—早奥陶世(Arenig 世);B—早志留世(Liandovery 世);C—晚志留世(罗德洛世),依动物化石证据,此时亚皮特斯洋基本关闭

4. 泥盆纪时期

加里东褶皱运动使北大西洋大陆显著地扩大了。从此以后差不多就再没有褶皱运动波及英国和斯堪的纳维亚一带了,这可由泥盆系地层产状近水平或微呈波状起伏,而且是陆相沉积等特征得到证明。也可以说是古大西洋的关闭,导致劳亚大陆的增生。从美国到加拿大(阿巴拉契亚)再经英国北部到格林兰和斯堪的纳维亚北端的巨大山系的上升(图 3—4A)。早泥盆世大范围花岗岩的侵入和伴随的火山岩活动,可能造成早古生代生油层的破坏而变质成石墨,如在英国湖区所见那样。

早期老红色砂岩沉积限于山间湖盆中(图 3—5)。在刚形成的加里东山系南缘,它们沉积时的水系是平行山前带的,但是不远就流经当时的北部河道位置。由于盆地形态不断变化导致晚期老红色砂岩向米德兰山谷和直接与北部北海区相通的诺森伯兰坳槽搬运。那时泥盆纪的海区仅达英国南部地区只有一海槽深入到北部北海(见图 3—5)。

奥克尼(Orcadian)盆地(见图 3—5)内老红色砂岩地层厚达 5km 以上,似乎主要发育在大格林(Great Glen)扭动断层的两侧(见图 3—4B)。从奥克尼盆地内老红厚层砂岩沉积的位置和变形的情况来看,可能是由于拉张和挤压应力相互作用并伴生水平位移的结果。

原始特提斯从早古生代开始就已存在,一直保持到晚石炭世华力西造山运动才关闭(图 3—1E)。其后的构造发展可能是受通古斯海关闭抑或与加里东造山作用有关,中泥盆世时,

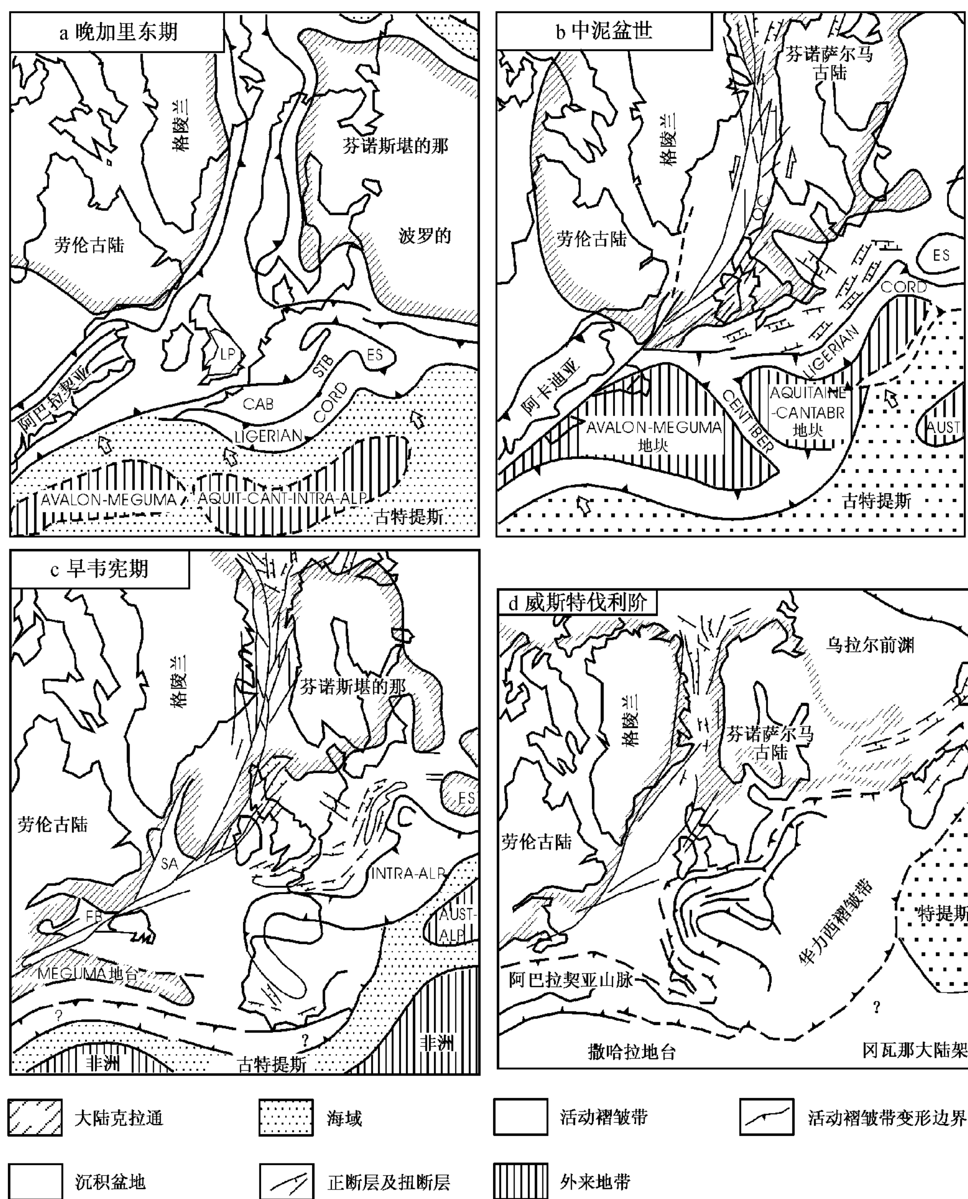


图 3—4　晚加里东期—威斯特伐利亚期北大西洋构造格架示意图

海的一个分支，向北延展到奥克和阿盖尔油田，那里有浅海碳酸盐岩和蒸发岩沉积（图 3—5）。这条海的分支似乎沿着后期中央地堑这条线关闭。显示出一条脆弱的老的构造线反复继承活动的特点。

到晚泥盆世时，老红色砂岩大陆沉积广泛分布在整个北海区的坳陷区，其范围东达斯堪的纳维亚高地，西达至苏格兰高地，东南达到爱尔兰—威尔士—伦敦—布拉班特（Brabant）高地（图 3—5）。泥盆纪盆地的形态和大小，大约相似于中生代的北海盆地。

5. 石炭纪时期

石炭系是南部北海和荷兰—德国—波兰含气带的生油层。该地区含煤沉积主要成煤期是该系的维斯德阶，沉积厚度达 2500m，局部地区聚煤厚度超过 75m。

在北部北海盆地范围内保留下来了石炭系地层分布概貌(如图 3—6)。在北部北海范围内据目前资料在中北海隆起和林克宾芬隆起上,尚存有下石炭系中段以上及维斯法阶 A 段的地层而其他广大范围内仅在局部发现,而且厚度也大大的减薄了。

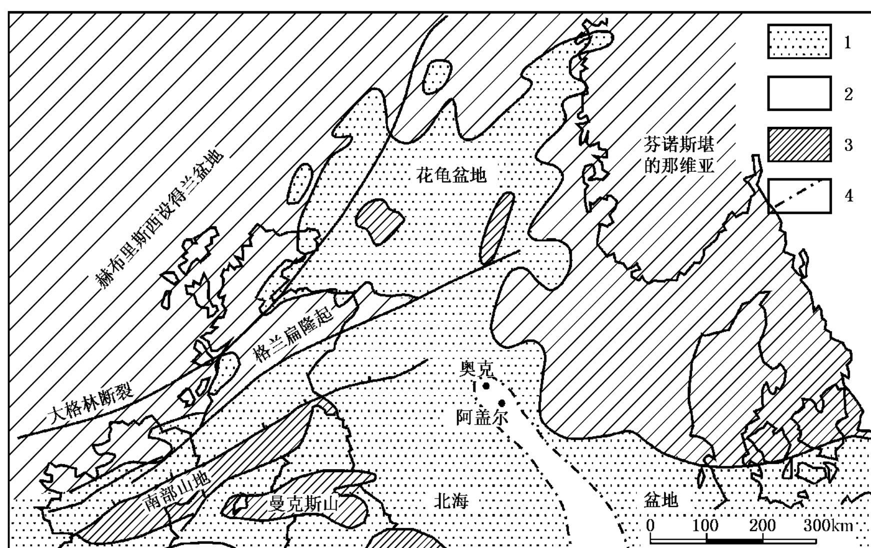


图 3—5 北部北海盆地泥盆系陆相老红砂岩及海相沉积

1—老红砂岩；2—海相泥盆系；3—前泥盆纪；4—泥盆系海侵线

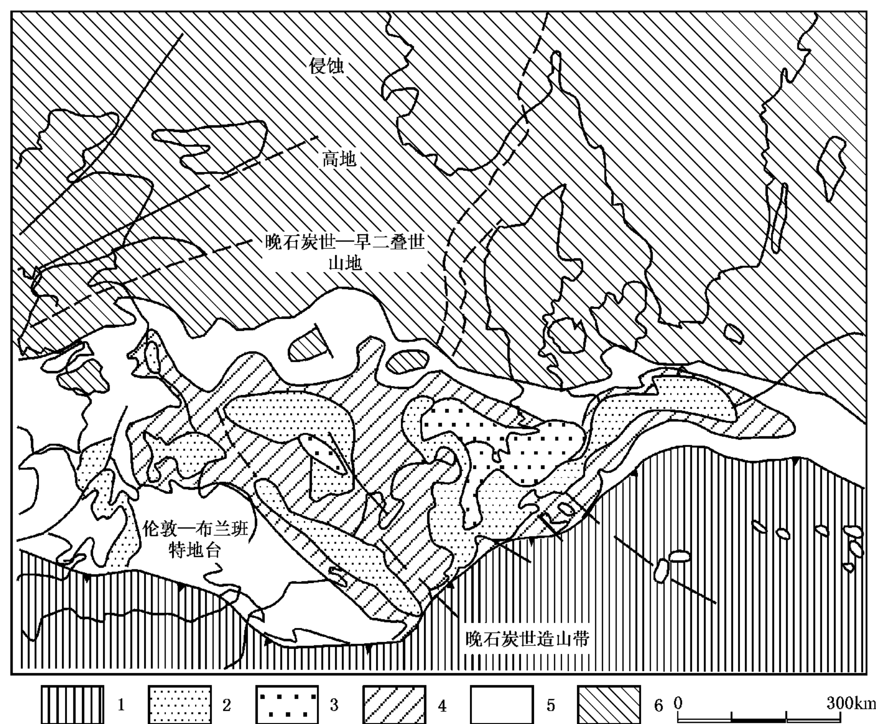


图 3—6 北海石炭纪地层分布

1—华力西褶皱带；；2—斯蒂芬阶；3—威斯伐利亚阶 C/D；4—威斯伐利亚阶 A/B；
5—纳缪尔阶；6—前石炭纪

狄南期(Dinantian)

早石炭世时期由于劳亚大陆缓慢的向北漂移,使南半球干旱气候条件下沉积的老红色砂岩向上逐渐过渡到赤道型的浅海相石灰岩沉积和较潮湿气候的石炭系含煤沉积。在南部北海广泛分布着该期海相地层,但向北部则出现石炭纪 Cemetstone 群的泥裂状页岩和泥质白云岩,表明是在内陆状态下海水遭受周期性的干旱作用的沉积,因而在苏格兰的中部谷地形成了滨湖和湖相条件下很厚的油页岩沉积。

陆相和海相交替演变(包括煤系地层形成),反映出冈瓦纳石炭纪—二叠纪冰期所引起的海平面升降变化。由于冰期诱发的海平面升降可能影响整个石炭纪的沉积作用,特别是大范围内的维斯法期煤系具有此特征。在英国东北部的韦宪期周期性的沉积作用,包括海相的石灰岩煤系地层是著名的约尔德尔(Yoredale)层。这套地层仅在所钻的北海中部隆起的钻井中获得了该层的近似年龄值。

在有些地区(如米德兰山谷等地),沉降作用是与火成岩活动伴生的,但到纳缪尔和早维斯法期,地堑发育和火成岩活动均停止了。推测与华力西造山期发生南北向的挤压有关。

纳缪尔期(Namurian)

纳缪尔期形成的河流—三角洲相的砂岩、煤系及海相页岩,就是著名的磨拉石砂岩(Millstone Grit)层,这套发育较好的地层似乎仅限于南北向延伸带中,它与现今的奔宁(Penuine)隆起的轴线是一致的,向东西两侧显著减薄。该阶地层仅在本研究区的西南部在奔宁山脉中见有出露。

维斯法期和斯蒂芬期

该时期在南部北海盆地及周缘广泛分布,而且是煤系地层的主要发育时期,特别是维斯法期沉积很厚,厚度可达 1200m。但向北到中北海隆起—林克宾芬隆起则逐渐减薄,在北部北海盆地中仅在局部有维斯法阶一部分地层,在许多钻井中仅钻到石炭系地层,厚不超过 10～20m,在二叠系风成沉积之前,其中许多地层已被氧化成紫褐色。由于氧化地层覆盖缺失,早被氧化的维斯法最晚期和斯蒂芬期红色地层,被称作伯来恩(Barren)红色标准层。

6. 华力西造山运动

泥盆纪末和早石炭世时,原特提斯的洋壳向北俯冲,使劳亚和冈瓦纳大陆靠进。但是两大陆发生碰撞可能在韦宪晚期,造山活动导致华力西褶皱山系的形成,一直持续到晚维斯法—早斯蒂芬期(表 3－1)。这个山系位于新形成的联合古陆的核心部分(图 3－1E)从摩洛哥一直延续到西班牙、法国、德国、波兰的南部和罗马尼亚(图 3－4D)。伴随华力西造山运动发生的南北向挤压,在劳亚和冈瓦纳大陆之间变为东西方向上的相对拉张运动。从萨克森(P_2)阶开始,南部北海和北部北海二叠纪盆地开始沉降,这时蔡希斯坦海侵区已发育成为重要的沉积中心。

北海地区在东西向的拉张运动在华力西造山期起着重要的作用,这种作用在以后的 2 亿年期间又多次活动。

7. 早二叠世时期的火山活动和盆地发育

上述表明,一个是南北向挤压,另一个是东西向拉张,两种明显对立的构造作用同时或彼此相继发生,从而造成了盆地展布的基本特点。

(1)从苏格兰到斯堪的纳维亚的加里东褶皱带到南延至海西褶皱带之间的地区,是受两个东西向的盆地控制,即南部北海和北部北海二叠纪盆地。其间被中北海—林克宾芬隆起所分隔。

(2)中央和霍思地堑几乎垂直切过这些盆地和隆起,而这两个地堑又各自向北延伸进入维京和奥斯陆的两个地堑内。在霍恩地堑的东部还有切过林克宾芬隆起的一系列较小的地堑。

上述的有关拉张构造格局,是与晚石炭世至早二叠世的东西向扭动有关的,这些构造导致了局部地区的快速沉降和厚的早赤底世(Lower Rotliegend)火山岩的喷发,在北部北海盆地中该期火山活动可能主要与奥斯陆—班希勒(Bamble)—霍恩地堑系的发育有关,这些地堑是在维斯法阶的最晚期至斯蒂芬阶最早期,利用早已存在的早古生代甚至前寒武纪的构造薄弱带形成的(Russeland Smythe,1983)。在奥斯陆地堑内,这些火山活动发生于浅海沉积及风积沉积之前(Olaussen, 1982)。类似的巨厚火山岩也出现在霍恩地堑内,在中北海隆起至林克宾芬隆起的翼部及中央地堑内部,东西向岩脉群横切苏格兰的中部谷地及诺森伯兰海槽。

尽管在维京地堑内没有发现赤底型火山岩,但它形成最早的时期很可能与中央、霍恩、奥斯陆地堑同时,也许苏格兰的中部谷地和挪威西南地区的火山岩形成于晚石炭世至早二叠世,它标志着斯蒂芬—奥顿(Stephanian—Autunian)断裂体系的北部界限。

这样的解释与 Ziegler 的解释不同,但是目前尚没有充分地证据支持维京地堑和中央地堑的形成时期早于早三叠世或二叠纪最晚期的观点。Glennie 根据中央地堑内有近似于下赤底统的火山岩和在维京地堑以南 200km 内有晚二叠世蔡希斯坦盐岩(具有足够的厚度与底辟活动)来力图说明这个问题。此外,他还认为蔡希斯坦海盆的赤底世沙漠盆地迅速被海水淹没,其水源来自北极圈附近且经过早已存在的北大西洋断裂系(Glennie 和 Buller,1983)。这个断裂系在晚石炭世发育于北边较远的地区(表 3—1),但它到底是从石炭纪末期还是从早二叠世开始向南扩展到北部北海地区,目前还是一个有争议的问题。有关维京地堑南部存有厚的蔡希斯坦盐层的解释,是蔡希斯坦时期地壳早期凹陷的结果,到早三叠世又隆起,和随后在其年轻裂谷的翼部又发生侵蚀,这是 Ziegler(1982)提出的观点。另外,在裂谷两侧翼部发现三叠系直接覆于老红砂岩之上。

海西造山运动之后,在其褶皱带以北的部分地区形成了一片干旱的沙漠,风蚀作用强烈,雨量稀少,因而在北部北海盆地中堆积了赤底统砂岩(即通称的新红色砂岩),属干旱气候条件下的沙漠沉积。到晚二叠世蔡希斯坦海侵时,尤其是在蔡希斯坦沉积的早期,浅水盆地的边缘富含有机碳,而盆地中心的海底又深又暗,不适于有机碳的快速增长,再加上降雨量小,河流供应少,所以沉积物的注入速率很低。由于高温和快速蒸发作用,限制了海水和浅水变换的通路,从而使封闭的蔡希斯坦盆地成为一个具有强烈蒸发作用的凹地。首先沉积了一层石膏层,随后是一套厚层岩盐,最后是以可溶性极高的钾盐结束。虽然蔡希期坦盆地缺乏良好的沉积物供应,但他们最终还是被岩盐这些重要的化学沉积物所充填。

仔细划分蔡希斯坦统由 5 个沉积旋回组成,每个旋回都表明含盐度随时间而增加,旋回开始时具有低盐度的正常海水,而结束时则伴随着蒸发作用甚至可能干涸。这些海水可能来自于挪威和格陵兰之间的广海地区,其海水供应速度与全球海平面变化相一致,而海平面的波动又是与冈瓦纳大陆冰盖终端的进退相协调。

8. 二叠纪以后的构造演化特征

对大范围来说,这种地质发育情况涉及整个北海盆地更大范围所发生的地质事件,所以这里只就其内部关系的简单轮廓加以叙述。表 3—1 列出了它们在区域上某些方面的可对比性。要想彻底查明本区大范围内的地质事件,必须依靠遍布北海地区的高精度地震资料的解释。但由于缺乏清晰而连续的反射界面,对本区较老的地层就难于加以解释了。

有 3 个突出的地质事件影响着北海地区二叠纪以后的地质演化历史。第一,对北海地质

构造演化影响最小的事件，要算在晚三叠世至侏罗纪之间，古特提斯洋的打开导致了联合古陆(Pangaea)分裂为劳亚大陆和冈瓦纳大陆(表3－1)。第二，在中侏罗世后起着影响北大西洋诞生和劳亚大陆分裂为北美大陆和欧亚大陆这一事件(图3－1g)。在早侏罗世从北极到中大西洋之间的海道就已存在(Hallam，1977)。两大陆间的海底扩张作用在侏罗世仅局部开始，而此时也只限于中大西洋。北美洲和欧洲之间的地壳完全分离是晚古新世至早始新世期间才出现的，这种观点的依据来自挪威中部的大陆边缘。第三个事件是，白垩纪至第三纪早期，由于古特提斯洋的关闭，导致非洲与欧亚大陆的分离和阿尔卑褶皱链的诞生。

地壳破裂又重新联合叠加的变化方式，总体上是建立在大陆缓慢向北漂移的过程中，使北海地质从泥盆纪在赤道以南逐渐漂移到达它现今的纬度，大约跨越了从赤道到北极之间一半以上的里程。在岩石中记录了它在漂移过程中生物和沉积物方面受纬度气候的影响特征，而且它的漂移对其他板块运动也有着重大关系和相互影响。

东西向的拉张导致了北部北海盆地地堑系的形成，从而构成盆地的发育，这种发育是从晚古生代开始的，现代北大西洋扩张轴的活动，导致劳亚大陆地壳完全分隔是在始新世。这种地壳拉张和最终衰减的影响，使盆地具有下列3个方面的主要特征(表3－1)。

第一，由于地壳拉张和旋转断块的沉降引起地堑的进一步发育；这在晚侏罗世是很重要的，如在维京地堑内和Rockall—Faeroe海槽附近。

第二，由于走滑断层继承了先前的活动历史，使这些断层目前已贯穿整个盆地地区。在大区域内沿着较大的断层活动导致了主要坳陷(盆地)的发育。在几个孤立地带，发生了局部的沉降，如维京地堑中就有一个小规模的例子，可由Fagerland的地震资料来说明。就大规模而言，Broad Fourteens盆地在侏罗纪和早白垩世期间局部沉降了4000多米。走滑断层活动的结果，必然会影响到上覆层，它可能促使这些地区的蔡希斯坦统中的盐层发生底辟活动，这些地区的盐层厚达150多米，其上又有1000m或更厚的覆盖层。既然北部北海的底辟作用不是偶然发生的，就可根据底辟活动开始时的地层年代来推断局部断层活动的大约时间。在北部北海中央及南部北海地区，这种底辟活动在晚侏罗世至早白垩世发展到了顶峰，这就是所谓的晚启莫里阶(Kimmerian)运动。在有些地区底辟活动很清楚在中三叠世已局部开始，可能是与北海地堑系主要发育阶段有关的运动所引起。

第三，据推测隆起作用可能出现在地壳减薄与热力梯度增加相一致的地区，严重情况下，还会导致火山活动。这种隆起作用见于默里湾断层系和维京—中央地堑相交处，在那里有中侏罗世的火山活动。在古新世时期西设得兰台地上发育了类似的拱起作用，在维京地堑内导致了粗碎屑的重新沉积。更晚的穹隆作用发生在靠近Rockall—Faeroe海槽的大陆架上，有广泛的火山活动，在北爱尔兰和西苏格兰有高原玄武岩的喷发，并沿着早已存在的断裂发生岩脉群侵入，有一些已达到北部北海边缘地区。已有资料认为火山活动中心的冷凝作用会导致地壳的沉降和盆地形成(表3－1)。

由于地壳被拉张从而导致了地壳的均衡沉降，并得到沉积物的补偿。同样，均衡抬升将导致侵蚀作用发生。在地壳运动中，海平面升降的影响通常为其他更强的运动所掩盖。

在晚侏罗世的启莫里阶期间，全球性海平面的抬升，使海水侵入到沉降的维京—中央地堑内，导致了油源岩的形成；在其后的凡兰吟期(早白垩世)海平面的下降导致了早白垩世的广泛侵蚀，但某些侵蚀可能与海水发生迁移有关。

众所周知，北部北海盆地在晚白垩世开始沉降，一直持续到整个新生代。沉降带的中轴基本上在中央和维京地堑附近，那里的白垩系地层局部超过2000m。晚侏罗统启莫里阶页岩在

中央和维京地堑内埋深现已超过了3000m,这就是为什么有如此多的油气产生在这里的生油岩中并聚集在邻近的构造隆起的原因,通过区域API度变化的分析,可清楚看出,生油岩的埋深越大生成的石油API度越高,到达4300m深度时,生油岩达到过成熟,而仅能排出气态烃。

新生代的沉降格局应归因于下伏岩石圈的冷却和收缩,以及由于水体和沉积物负载增加,所引起的均衡调整,北部北海盆地下面的地壳显然有变薄的趋势,从挪威和设得兰岛屿下面的30～35km变到维京地堑下面的10～15km厚。Ziegler(1983)曾提出,并非所有的这种变薄作用都是由力学拉伸造成的,也有可能是壳下侵蚀作用的结果,但在裂谷作用阶段,这种作用是无法了解和证实的。

继中侏罗世火山喷发之后,在断层交叉点附近已没有与中央和维京地堑有关的火山活动了。因此,北海水下的新生代盆地的沉降,很可能与地壳减弱带下面的热异常降低有关,这种热降低在白垩纪已经开始。

回顾北部北海的构造发育史是在托恩基斯特洋关闭时对奥陶纪形成的地壳落弱带重复利用的结果。如果认为此带在泥盆纪已成为一个沉降轴的活,那么到后来就变成了拉张、挤压、走滑运动的叠加影响及热流体系的变化。

9.现代北北海地震横剖面的构造特征

图3—7是北北海地区的复合地震横剖面,可划分为4个主要地层单元,每一单元都通过岩心,岩屑及测井等资料对比及综合分析,在压域上确定了地层时代,概括起来其表现出来的基本特征有:

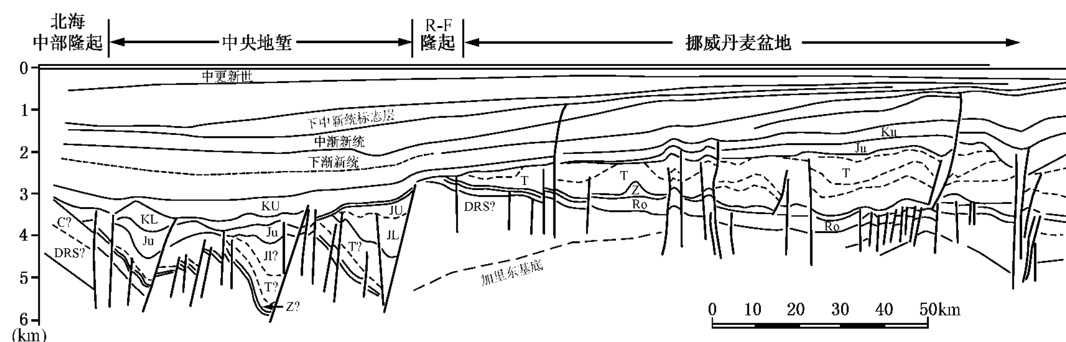


图3—7 北海北部盆地区域地震剖面图

P—早第三系;KU—上白垩;KL—下白垩统;JU—上侏罗统;JL—下侏罗统;TR—三叠系;Z—上二叠统;RO—下二叠统;C—石炭系;DRS—泥盆系老红砂岩

第一,前二叠纪的基底地层,在最深的部分仅有微弱的构造显示,其基底面起伏约有3s的双程时差,换算成深度大约有3000～4000m厚的上覆层。中央地堑的两翼地势最高。区域资料表明,基底反射面可能代表加里东期的强烈褶皱基底与上覆老红砂岩之间的侵蚀接触面。北海中部隆起的沉积层序特征,反映了可与下覆老红砂岩对应的石炭系地层的存在,并已为区域钻井资料所证实。

第二,根据地震构造特征,在挪威—丹麦盆地的基底岩石之上,覆有一个削蚀楔状沉积体,推测为早二叠世(赤底世)到晚侏罗世(已由钻井资料证实)的地层。在林克宾芬隆起北部边缘的钻井中已打穿赤底统,而在盆地中央则没有见到。晚二叠世的蔡希斯坦层通过典型的盐丘底辟特征来确认,它的底面形成一个可以进行区域对比的地震界面。前蔡希斯坦层很可能代表早二叠世的赤底统,它属于沙漠湖泊相。

继蔡希斯坦统之上覆盖着三叠系，其“厚度”大约是 1.5s 的双程时差。内部反射的几何形状表明，在中三叠世，甚至从早三叠世的晚期，蔡希斯坦盐层的底辟作用就已开始活动，在某些地区，由于蔡希斯坦盐层的底辟作用使三叠系地层遭到破坏。

三叠纪地层在中央地堑的边界断层附近，遭到均匀而强烈的切蚀，据测井资料对比，其上覆地层为上侏罗统，它仅分布在中央地堑的中心部位，上面广泛覆盖的是上白垩岩层，这套白垩层与基底之间(如在 R—F 隆起上)仅为很薄的下白垩统地层所隔。

第三，在中央地堑内，基底之下是一套从下二叠统到下白垩统的沉积序列。然而，这里晚侏罗世前的地层被拉张扭动形成了半地堑，而地堑和隆起之间则为上侏罗统至下白垩统的不规则地层所充填。从而限制了蔡希斯坦盐层的底辟作用。

第四，第二、三单元之上，为上白垩统白垩层所形成的不整合所覆盖，这套白垩层在中央地堑内厚度巨大。大多数未钻穿其上的上白垩统地层，表明在晚侏罗世—早白垩世地质事件之后，有一个相当长的构造稳定期。在晚白垩世后，仅有少数断层活动于中央地堑的两翼。中央地堑的上覆地层记录说明在整个地堑范围内新生代时期是一个相对稳定的沉降时期。新生代地层的演化层序表明整个沉积时期，物源来自于东部，这个时期具有与渐新世全球海平面下降相一致的海退建造的基本特征。

从横剖面上还可清晰地看到，挪威—丹麦盆地的两翼，在中侏罗世时期经历了强烈的抬升作用，这个过程几乎和中央地堑内的断块扭动旋转作用同时发生。和中央地堑一样，这个盆地的两翼自新生代以来经历了稳定的沉降过程，因而，地层产状都较平缓，呈向西倾斜的缓坡。

二、盆地古应力场与构造模式讨论

1.古应力场与视海平面变化的关系

地壳内的应力是以往和今天使地壳克服各种阻力，不断运动发展的原因；地壳各处发生的一切形变(包括破裂在内)，都是地应力作用的反映。因此，地壳上任何一种构造形变都反映出地应力的作用。通过各时期形成的构造要素间的相互关系和综合分析鉴定，即可反映出当时的古地应力场的基本特征。

Cloetingh 等(1986)的研究认为只要在岩石圈中存在着数百 MPa 数量级的水平应力，随着地质时间的增长其应力场的规模也要随之而改变。他还认为，冰川变化并非是产生速度超过 1cm/1000a 及达 100m 左右的视海平面变化的惟一机理，而根据古应力场的变化来解释视海平面的变化可能更合适。图 3—8 提出的模式说明应力场的变化起因于沉积物负载的不均衡。

(1)被动边缘岩石圈发生位移是由于热收缩和岩层的加固以及沉积物负载引起的。沉积物负载随时间而增长用沉积楔状体来表示，岩石圈被模式化为上覆有流体、大气圈的均匀弹性层，忽略陆壳和洋壳的差别。

(2)盆地边缘视海平面变化 | $|\Delta W|$(m)是由区域应力场变化叠加引起的。根据(1)中标准模式 | $|\Delta W|$ 是下覆岩石圈时代和沉积负载的函数，曲线给出 50、100、200MPa 的应力变化结果。

另有一些研究者(Lambeck 等，1984；Mcadoo 和 Sandwell，1985；Mcqueen ，1986；Stephenson 和 Lambeck，1985)在活动大陆边缘和板内构造背景下，独立进行的几个点上的岩石圈变形的研究也得出与上述大致相同的结论，即水平应力存在于岩石圈，其应力的大小达到几百个 MPa 就会引起板内应力场的变化，从而改变盆地的形状。当出现水平挤压时，盆地边缘

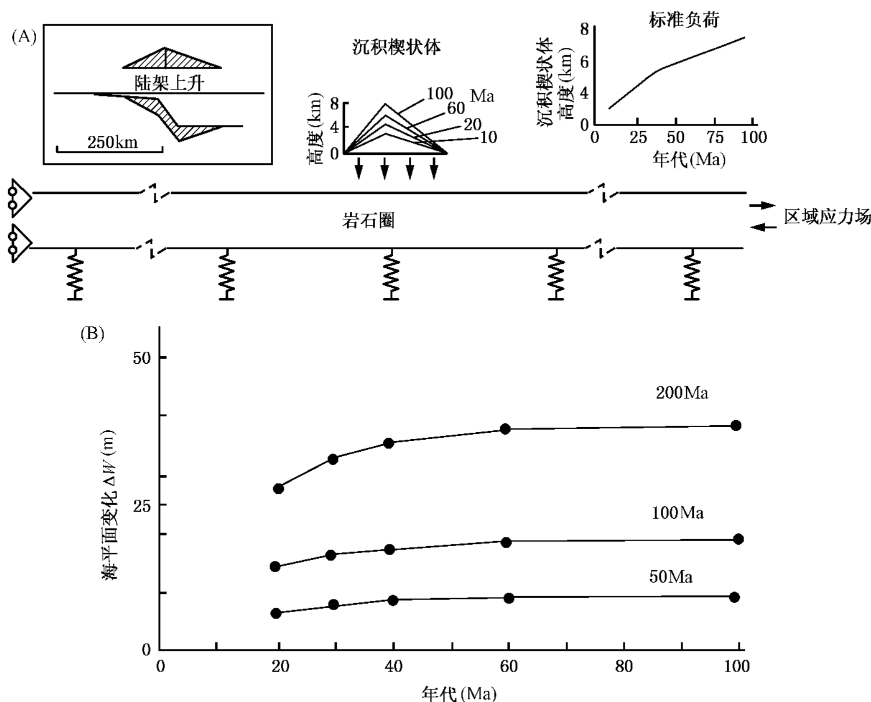


图 3－8 由 Cloetingh 等(1985)提出的平面应力场变化引起视海平面变化的模式

挠曲隆起增强，且朝海方向移动；出现基底抬升，发生退覆，结果视海平面下降，可能使沉积物暴露发生侵蚀或出现风化层。对于水平张性应力场来说，盆地边缘沉降增强，视海平面上升，使沉积范围扩大，可能出现相应的相变，这种相变的特征取决于沉积物供给特征。在盆地中心所诱发的变化，尽管大小相同，但与总沉降相比显得小而且意义不大。Hallam(1987)已经指出，大量的侏罗系不整合，局限于北海盆地侧翼，和预测的构造机理一致，这表明在盆地演化模式中板内应力的联合主要可以预测一系列的超覆退覆类型。正是由于北海地区是造山带和断裂带的交接地带，在整个显生宙发生的造山事件与断裂活动交替出现，这样，可以预知随应力状态的变化盆地出现的变化。

早侏罗世到晚中新世分区的海平面变化曲线和复合海平面变化曲线列于图 3－9，这只是表示海平面的一般定性变化。这种视海平面曲线的主要特征首先是在侏罗纪—白垩纪时海平面逐步上升，到了第三纪时海平面下降。通常认为这个旋回是具全球规模的，有人把它与联合古陆的解体联系起来进行解释，也是不无道理的。也就是说运用区域应力状态来解释相对海平面曲线变化是完全可能的。但有几个复杂问题在解释时应当引起注意。首先，要获得应力的定量值，应该把盆地的形成机理看成是岩石圈的参数。在一个特定的地区中，不同时期可以出现不同的差异沉降机制，甚至在同一盆地不同位置上也出现超覆/退覆层序。局部是受断层控制的。第二，相对海平面变化既是构造的，也是海平面升降作用的函数(Hallam，1987)。如果在相同时间内两者都出现，那么海平面变化曲线的解释将变得更为复杂，也就是说，海平面变化不都是反映应力的变化。

第三纪北海曲线是据 Vail 等(1977)修改而成；白垩纪北海曲线据 Hancock(1984)做出；侏罗纪曲线是据 Vail 和 Toddl 在维京地堑及内默里湾盆地做出(1981)。最后列出的西北欧盆地中新生代平均海平面曲线是据其左侧资料列出的。为估计海平面变化相对规模，采用渐

图 3—9　中生代—新生代超覆/退覆曲线及视海平面变化

新世海平面下降 50m，白垩纪上升 150m，侏罗纪上升 150m。

Ziegler(1982)曾对西欧(包括北海在内)进行过详细的描述，中生代的构造以水平引张为主，并伴随有地堑发育的特征，而且后期变形大都集中在这些地堑中。由此可见，盆地形成的主要机理是地壳的拉伸和沉降。在第三纪时期，是构造活动的相对静止期，盆地演化主要受岩石圈冷却引起的热沉降所控制。可在区域上也受阿尔卑斯造山作用挤压事件的影响，使盆地产生偏转达 1000km，特别是在阿尔卑斯碰撞带前缘的北部最为明显。Ziegler 等(1982)曾指出，北海盆地构造的演变阶段是与古大西洋及特提斯洋的打开、关闭历史的发展变化紧密联系在一起，且具有可比性。古大西洋和特提斯洋扩张速率的变化又与板块构造应力的变化密切相关。北海地区的古应力场由该区的构造走向玫瑰花图显示出三叠纪时以东—西向构造为主到晚白垩世时转为以北—南向为主(Thorne，1986)，所测量的古应力方向也反映了这种构造走向的特点(Letouzey，1986)。另外，在北海地区这些应力变化和盐底辟作用的时间可能存在着成因联系(Thorne，1986)。

中生代时期主要为区域水平张应力大小的变化，这从中生代海平面上升和第三纪海平面下降的一级旋回就可明显地看出在这段时间里水平应力状态所占的位置，主要是以张性水平应力为主导(图 3—10)，致使盆地基底沉降，或是地堑的形成，由于沉积负载使得地堑侧翼沉降，形成这种状况只需要数百 MPa 大小的张应力就可以完成。

晚白垩世末期，引张迅速减小，或者说形成以挤压应力为主的状况，导致构造走向的偏转，由早侏罗世至早第三纪拉拉米构造阶段(图 3—10)，主要为引张事件，影响了整个北海地区及其周围西北欧地区。这些事件与联合古陆的解体和断裂的复活有关。正如 Ziegler(1978)指出的侏罗纪至白垩纪北海属断裂期，可以与其海平面降低进行明显的对比。其中，中白垩世(森诺曼阶和土伦阶)海平面的降低，似乎与北海断裂期无关。第三纪期间海平面降低出现于阿尔卑斯造山作用的各个褶皱阶段。如中渐新世海平面变化代表了造山作用一个主要挤压阶段，而中古新世的海平面下降有可能与阿尔卑斯造山作用的第一阶段有关，而与大约相同时期

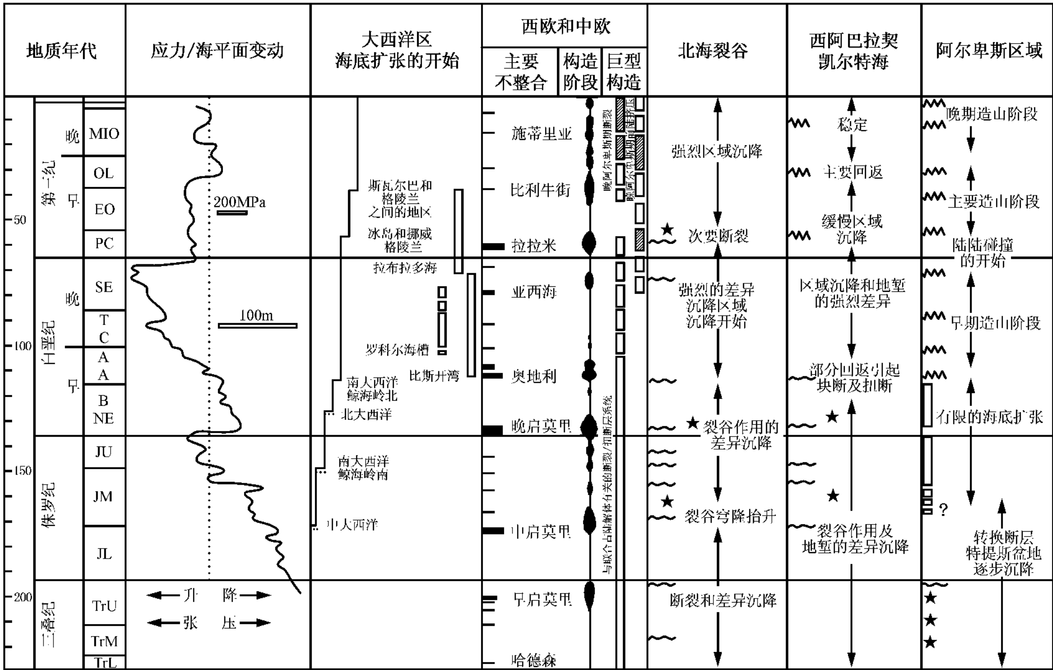


图 3—10　根据图 3—9 盆地概括性海平面曲线作出的综合古应力曲线

粗细波状线表示主、次断裂阶段；粗细锯齿线表示主、次褶皱阶段，五角星表示非火山作用阶段

在北海看到的强烈断裂无关。从图 3—10 看出，产生中渐新世海平面下降 50m 需要大约 200～300MPa 的应力变化，这是上限。应力的松弛和流变与深度有关。一个年轻的地壳当处于快速沉积作用期和已有断裂的运动都能导致对岩石圈应力产生差异的影响。

依据海平面升降信息来分辨区域事件通常是很有意义的工作，特别是当地层对比不精确的时候就具有现实意义（Hallam，1984，1987）。根据海平面变化受区域构造控制的资料做出北海地区的古应力曲线，可以反过来检验北海地区各个坳陷（盆地）的地层记录，从而为区分海平面升降单元和构造单元提供了一种新方法。

2. 盆地的构造模式讨论

不同类型的构造变形形成的构造组合特征不同，这已为实验室中的小规模实验所证实。实验导致对典型组合及其共生类型作变形受力方向的分类。已有资料证实，实验室的小规模构造组合与自然界中发现的那些有明显的相似性。

人们业已接受盆地和地堑是由某种拉张作用产生的，而且在世界上许多地方已经得到证明。对盆地的直接观察，已经证实数个盆地和地堑的形成是两个或更多个基底板块间的右侧平移运动和左侧平移运动的结果。这种拉张作用能够引起消减作用及沿破坏边缘形成地震和山链，是已知事实。但这种拉张作用在不同地区的表现却是不尽相同的，而且是各具特点的。图 3—11 提出的只不过是许多可能解释中的一个模式，结合西北欧构造历史的板内构造作用，对北海中央地堑的构造演化模式进行一些讨论。

以中央地堑南段为例（主要是丹麦部分的研究成果）可进一步分为数个地质区（图 3—12），每区都具有特征的构造组合及形变类型，这些区的特征可以归纳如下。

南部盐穹区

该区东邻东北海隆起（位于霍恩海槽和中央地堑之间，属林克宾芬隆起一段，西受从德国

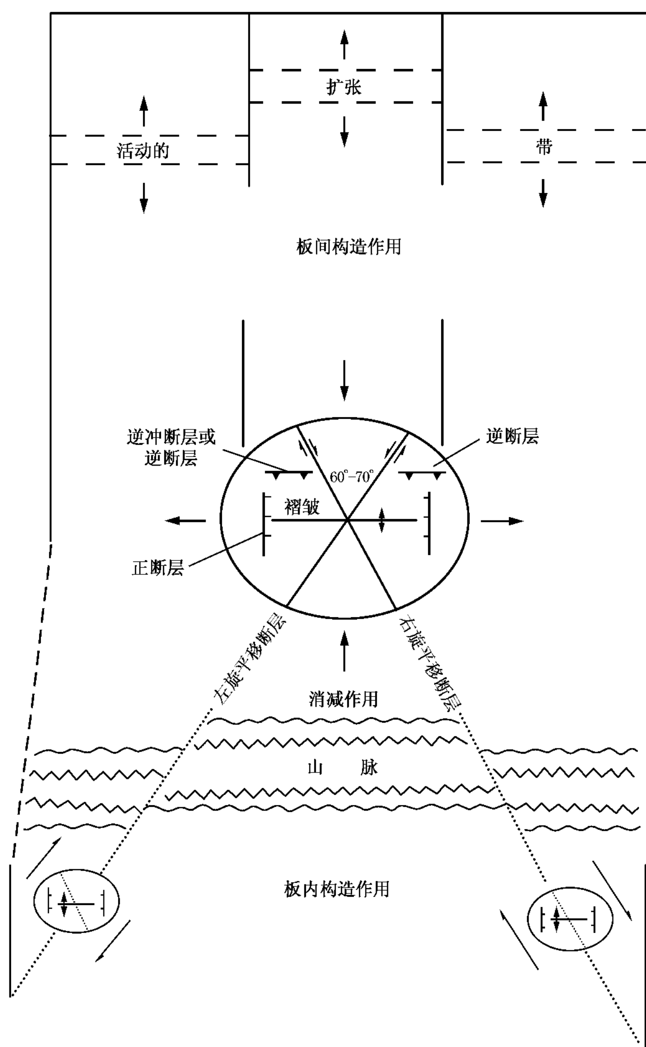


图 3－11　板间构造和板内构造的可能关系

向北延伸的掀转正断层的影响)。北界与 Tail End 地堑呈过渡状态。该区以厚的蔡希斯坦统、三叠系和侏罗系沉积为特征,上面被白垩系沉积不整合覆盖(图 3－12a)。

Tail End 地堑

南部盐穹区的北延部分就是 Tail End 地堑,其东邻东北海隆起,北邻曼达尔(Mandal)复合体,西与挪威中央地堑为界(图 3－12b 和 c)。于该地堑中蔡希斯坦统蒸发岩厚度小,在盆地中心存在有较厚的三叠系地层,但在边缘已受到强烈侵蚀。最厚的沉积层是上侏罗统粘土岩,它在该地堑的中心位置厚度超过 4000m,侏罗系与白垩系呈不整合接触。该区构造特征是以断层限定该区边界,局部也具盐构造、逆断层及褶皱。

曼达尔复合体

该复合体东邻东北海隆起之北延部分,西接挪威中央地堑,朝东南与 Tail End 地堑为界,该区以局部保存在掀转正断层块上的蔡希斯坦统、三叠系和中侏罗统沉积为特征,上侏罗统和白垩系沉积不整合上覆(图 3－12d)。该区的构造特征是大的正断层及非常小的由三叠系蒸

发岩的流动所形成的盐构造。

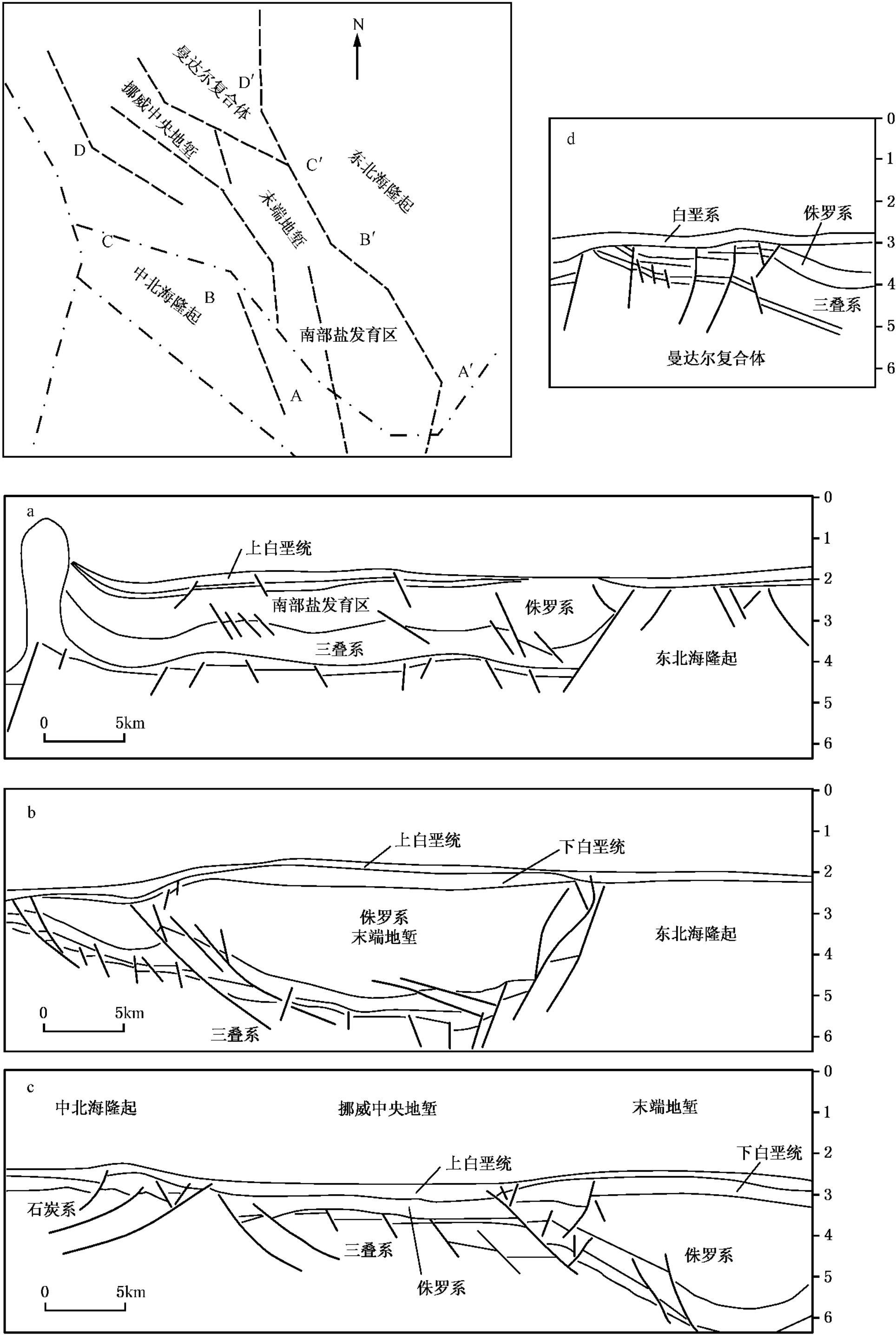


图 3－12　中央地堑(丹麦段)次级分区及通过该区的地震剖面

a—**南部盐穹区**(A **线**);b—Tail End **地堑**(B **线**);c—**中北海隆起**、**中央地堑和** Tail End **地堑**(C **线**);d—**曼达尔复合体**(D **线**)

挪威中央地堑

挪威中央地堑东邻曼达尔复合体和 Tail End 地堑，西邻中北海隆起（图 3—12c），该区以蔡希斯坦统的沉积层序非常薄为特征，三叠系和中侏罗统厚度薄且局部缺失，前中侏罗统为白垩系不整合上覆。该区构造特征为基底正断层，且都消失在侏罗纪地层中。

中北海隆起

这个区（图 3—12c）东邻挪威中央地堑，南邻南部盐穹区的西延部分，该区以厚的石炭系层序为特征，其上赤底统、侏罗系均为白垩系不整合上覆。该区构造上以大的正断层及逆断层为特征。

从上述分区特征概况，可以看出该区域构造的演化及形变特征是非常复杂的，这仅是几个代表性的剖面情况，从该区整体来看又如何呢？从图 3—13 的 3 张不同时期的构造图就可一目了然。

图 3—13a，白垩系基面构造图，显示出该区的一些主要构造特征，断层走向为北西—南东，在不同的次一级构造单元中都有背斜相伴生，沿 Tail End 地堑和中北海隆起之接合部出现了典型的挤压构造组合，但是所有的形变都与收敛的右旋走向滑移断裂作用有关。这种形变类型可以在不同深度的等时面上追踪，直至白垩系顶部。

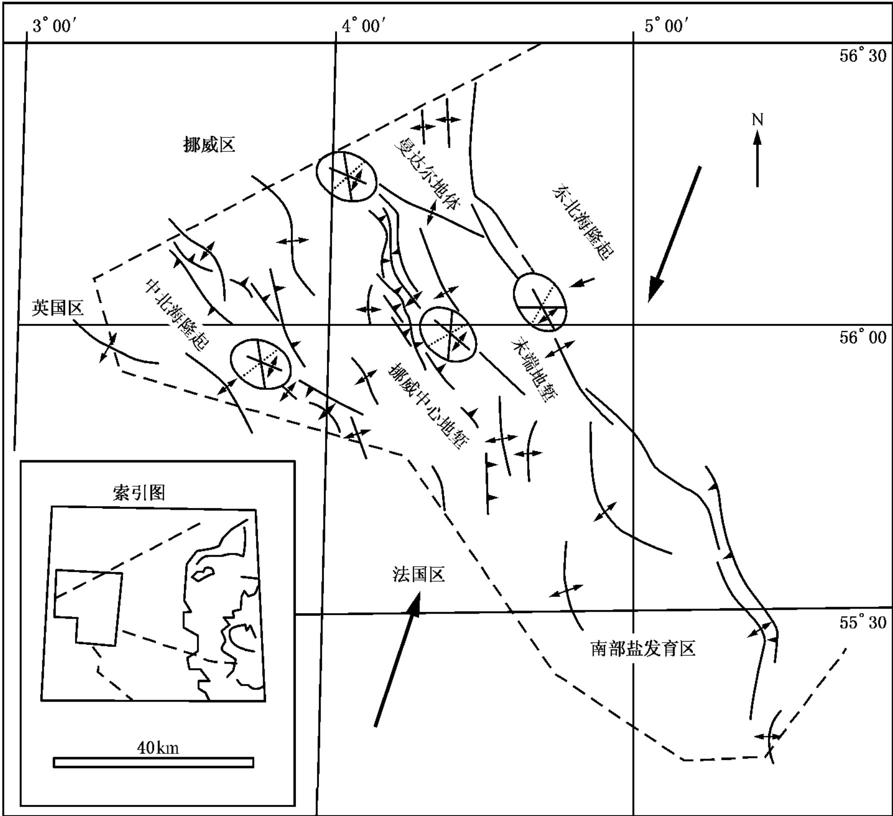


图 3—13(a) 依白垩系基面所作构造图

三叠纪顶部构造图（图 3—13b）上的构造组合显示出的特征只有用左旋走向滑移运动才能对它们几何形态做出恰当的解释。左旋走向滑移运动应该是平行的或是分叉的，该种情况解释了 Tail End 地堑中巨厚的上侏罗统沉积（图 3—13c）。

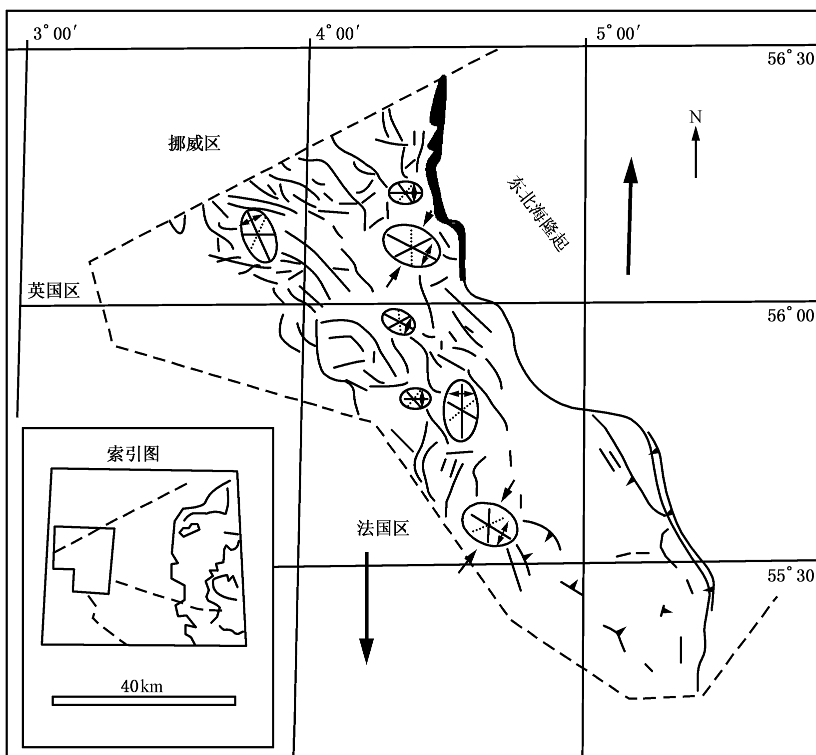
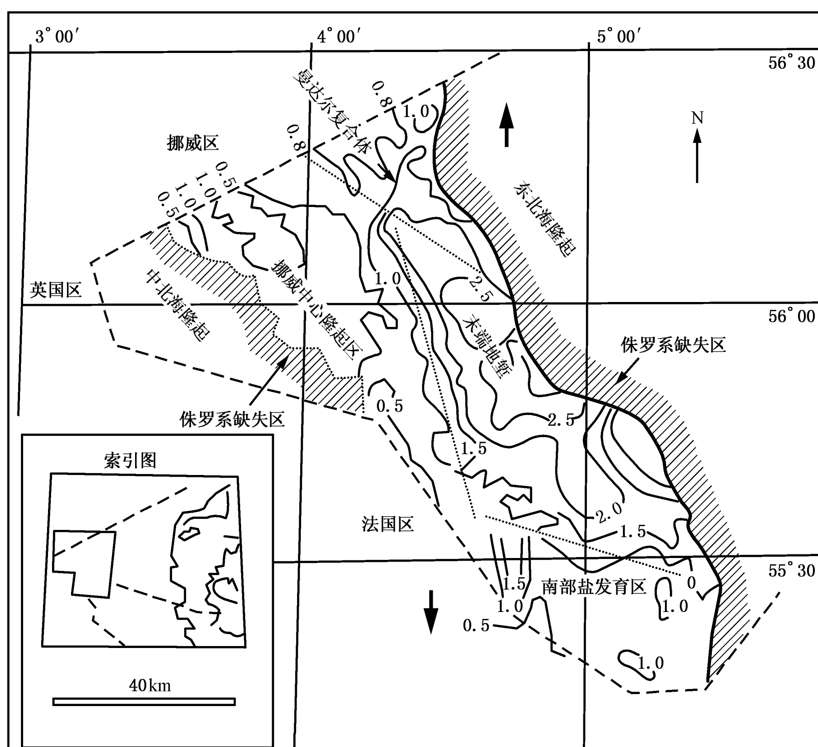


图 3—13(b)　**依三叠系顶面所作构造**



二叠系底面的构造图所表现出的构造组合特征，说明左旋走向滑移运动可能在二叠系沉积时就已发生过，一直延续到三叠系或更晚。中央地堑（丹麦段）的实例研究（图 3－14），表明主要的构造作用力在该区的各个单元中都是活跃的，而且表明沉积区的轴向一般平行于走向滑动剪切运动，而沉积作用主要受同沉积断裂的控制。

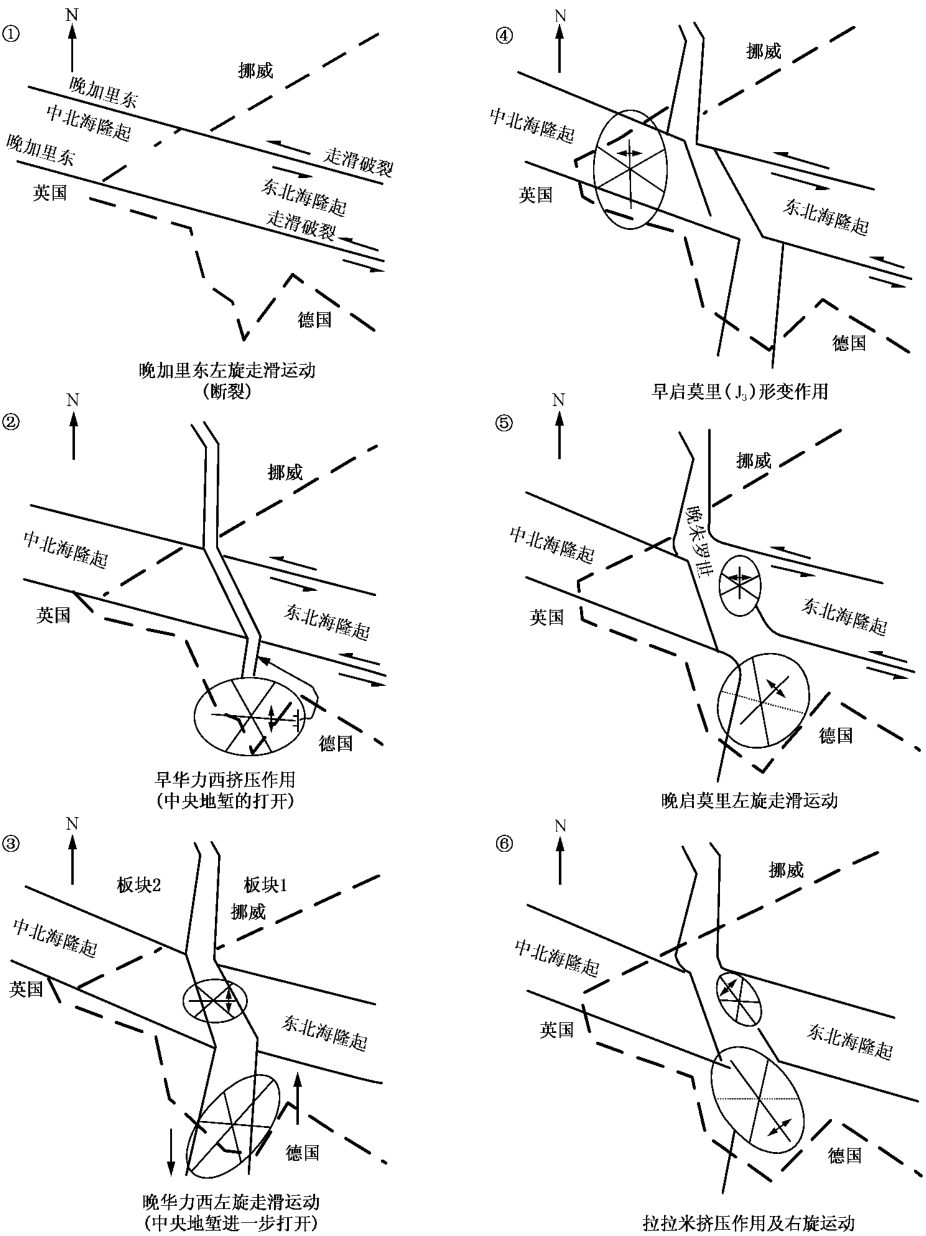


图 3－14　中央地堑（丹麦段）构造演化模式图

通过蔡希斯坦统、三叠系、侏罗系和下白垩统等厚线图（图 3－15），表明整个北海地区沉积的分布严格受断层控制，也是一些不同时期的区域构造模式简况。

在邻近挪威南部北西—南东向断层为边界的次级箕状盆地中蔡希斯坦统沉积非常厚（图 3－15a），次级盆地的延伸，可能是由挤压性质的板块构造运动产生的，在这北西西轴向的两个

盆地的构造迁移方面近于平行左旋和右旋走向滑移剪切方向。

沿挪威南部北西—南东向断层为边界的盆地中，三叠系沉积（图 3－15b）也是厚的，但最厚的层序发现于北—南向的地堑系统中，三叠纪早期挤压性质的板块构造运动方向继承了二叠纪的方向，而北—南向的地堑表明中晚三叠世构造挤压方向已从北西西变到北西。

在侏罗纪沉积时其厚度大的地方仅发现于沿北—南和北西—南东向的断层系统中（图 3－15c），这些方向平行于区域挤压性质的板块构造运动的走向滑移剪切方向。

北西向的挤压作用持续到白垩纪，在具有厚的侏罗系沉积的地区也形成下白垩统的沉积作用（图 3－15d），构造挤压作用的方向在早白垩世末变到北北东，这种变化导致了在中央地堑较老的左旋剪切带转化为右旋剪切带。

上述几个不同时期的构造演化模式，说明北海地区是由北西西的挤压作用，逐渐转为北西而再转为北东方向，从面控制其区域的沉积分布特征的走向滑移运动，也由左旋为主最后转化为右旋走向滑移特征了。

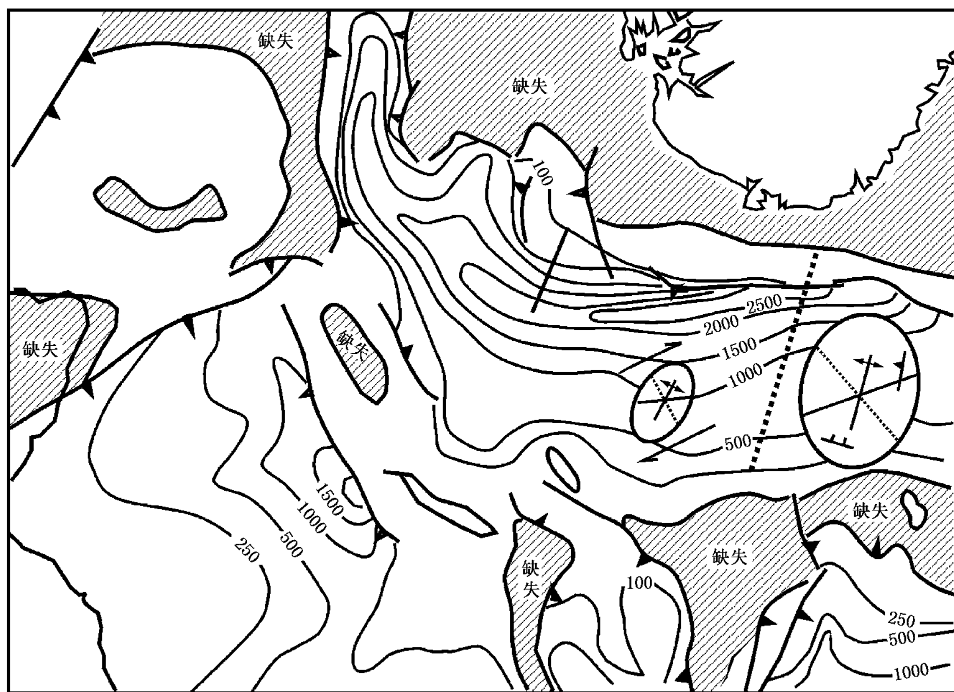


图 3－15(a)　上二叠统（蔡希斯坦统）等厚线图及可能的挤压构造模式

（等厚线间距＝250m）

三、盆地深层地震资料的解释

利用深部地震剖面，现已能够指明达莫霍面的地壳结构（BIRPS 和 ECORS，1986；Pinet，和 McGeary 等，1986）。由于网格化地震剖面的激增，以及处理和解释技术的提高，使之对北海地区的地质历史有了更深入的了解。但是目前资料的现状，作全面综合报导的少。而多分区或小范围的报导较多，这也为较全面系统深入地认识北部北海盆地，增加了一定的难度。尽管如此，还是力图能综合现有搜集到的物探成果，对盆地的发生、发展及演化做出有说服力的回答。

最早提出的北海地堑模式（例如Ziegler，1982）基本上是成对称的，随着平衡剖面概念的引

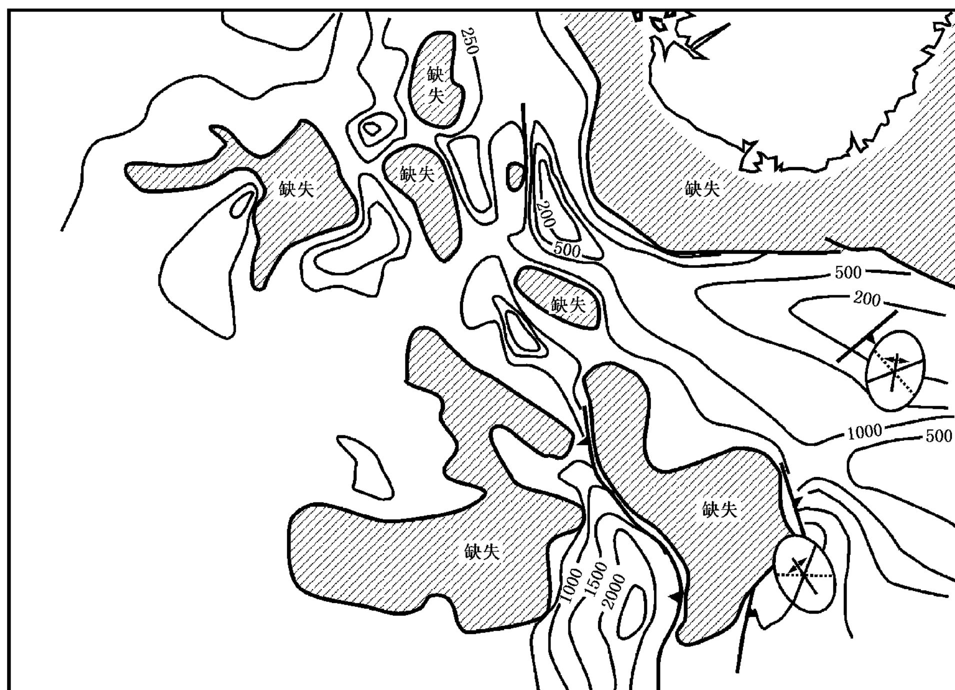


图 3－15(b)　三叠系等厚线图及可能的挤压构造模式

(等厚线间距＝250m)

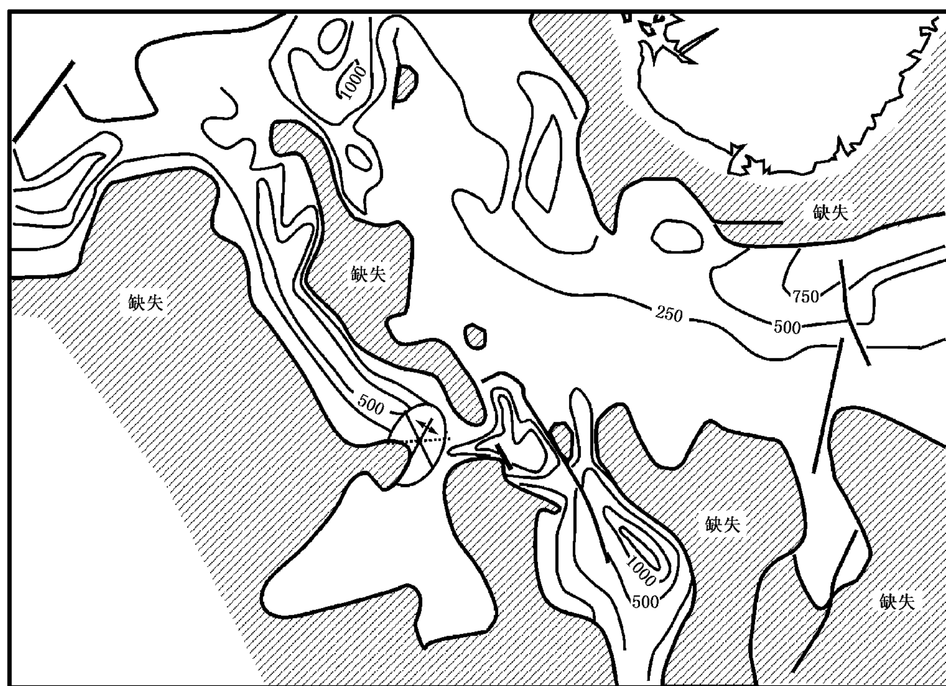


图 3－15(c)　侏罗系等厚线图及可能的挤压构造模式

(等厚线间距＝250m)



图 3－15(d)　下白垩统等厚线图及可能的挤压构造模式

(等厚线间距＝250m)

进和应用到北海盆地,使其解释进一步深化。Gibbs(1984,1987)提出中央地堑发育在一个向西倾斜的剪切带上,这个模式是以中生代地堑中的掀斜断块几何形态为依据的。似乎为解释北海构造现象提供了一个很有用的模式,而且这种模式在勘探深部构造中获得成功(例如 Brewer 和 Smythe,1984;McGeary 和 Warner,1985),大大鼓舞了在该区进行勘探的人们,试图作横穿盆地的剖面。他们把横穿盆地的深成地震剖面工作称为 MSOP 项目,这个项目的工作表示在图 3－16。所有大反射层的测线图都以数个不同的比例尺,做出组合测线综合图,在 4 条测线上都建立了一系列的地质模式并做出了比较,目的是在于能够忠实地反映地震资料的模式,使得各测线间几何形态的解释有依据,并可与该区已获得的非常大量的勘探资料进行对比。此外,还利用了该区周边区域地震及地质历史的区域资料,从而形成比较客观且符合实际的模式。该模式不仅对了解北海盆地地质,而且对了解欧洲的一般地质情况都有着重要意义。

中生代盆地叠复于加里东碰撞构造之上(Matthews 和 Cheadle,1986),泥盆纪盆地似乎也与加里东逆冲断层面的活化有关,该模式已成功地用于挪威的 Hornelen 盆地体系(Hossaek,1984),对于解释泥盆纪的发育来说也是一个强有力的模式。在北部北海地区的泥盆系岩石出现是比较广泛的,在深井中普通有发现。泥盆纪盆地形成于志留纪末造山运动,而且具有张性或走滑的盆地特点。泥盆纪盆地的对称性直接受加里东期各向异性的控制,NSDP 资料清楚地显示出,在中生代期间下侏罗统和三叠系的掀斜断块大多朝西掀斜,地震资料显示了某些朝东倾斜的波组,其被认为代表了朝西倾斜的断块,发育在朝东倾斜的张性断层上所显示的特征。在东设德兰地体之下根据区域的几何形态和深度计算,显示出在下到中地壳有一滑脱面。在这些剖面中,有数个规模不等的走滑和转换组分(Gibbs,1984;Beach,1985)穿过每条测线。马格努斯盆地被认为是受朝北拉张的大格林断层带控制的倾斜的滑动体系。即隔开盆

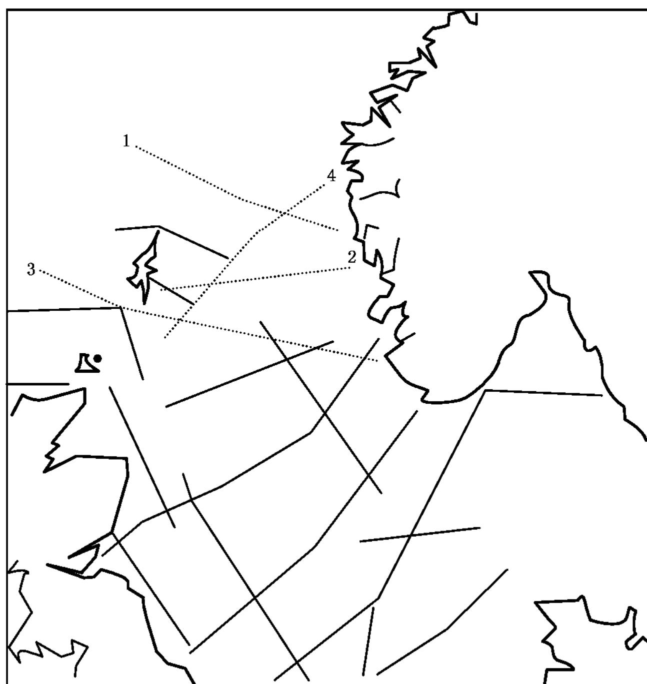


图 3—16　北海北部 NSDP 及 BIRPS 调查的位置图
（图中 1、2、3、4 测线为图 3—17 中所用资料）

地的这一侧是在中地壳朝东倾斜面上滑脱（图 3—17）而不是在底部滑脱。在最北的侧线中，穿过古尔法克斯构造，可清楚地见到北维京地堑的边界断层。该断层向南延续到 2、4 测线，因此很可能是一个深成的断层，可应用平衡剖面方法予以证实，还可以模式化为图 3—18 的型式，这是由计算机模拟形成的。相关的中地壳滑脱面及构成维京地堑西部边缘的断层在地壳底部滑动一定距离之后，然后向上进入了在上地幔见到的朝东倾斜的一组地震反射层。这种反射层在所有的 4 条 NSDP 测线及 Beach 等（1986）所描述的那些剖面上都有出现。恰当的解释是，维京地堑是在一个朝东倾斜的岩石圈“简单剪切”形成的剪切带上发育起来的，除了这种基本的剪切，挪威地区存在着数条反向断层形成相对简单的滚动式切割。这也说明其形成条件的复杂和多样，绝非用一种简单的模式所能完全解释的，很可能是多次应力叠加形成的特征。

对北维京地堑来说，引起扩张的原因已表示在图 3—17 中，在图 3—18 中作了模式化解释。应用观察到的大量滑脱资料，表明斜断层或走滑断层的几何形态都属于常见的张性特征，而且在盆地历史发展中相对迟一些。为解决张性断裂及沉降之间的差异提出的似乎更合理的模式，应该是 Gibbs（1984）提出的复杂对冲断层崩落模式。这样的断层层序表示在图 3—19 中，在这个模式中，早期张裂小，因而保存了有意义的沉积厚度。但是，由于新的拆离断裂的叠加，使原有的拆离滑脱构造变的更为复杂，形成了新的组合关系（参见图 3—19a—d）。

上面所列的这个盆地模式对确定勘探战略有深远的影响，在北部北海运用该模式解释了英国和挪威地区构造和地层发育情况，发现它们之间具有很大的差异性。在英国地区，圈闭以高断块的张裂为特征，以及构造上控制的低洼处沉积作用为主。已知油田的进一步发展和新聚集区的发现将取决于稳定的构造和地层圈闭所组成的模式，在地震剖面上识别出来的掀斜层，以及可能被保存下来的地方，有可能发现新的油气聚集。在挪威地区，较好地发育着滚动

构造,构造圈闭大而简单,勘探工作已集中开发与大的滚动构造有关的圈闭上,以及相关的广泛存在的较厚的地质勘探层。

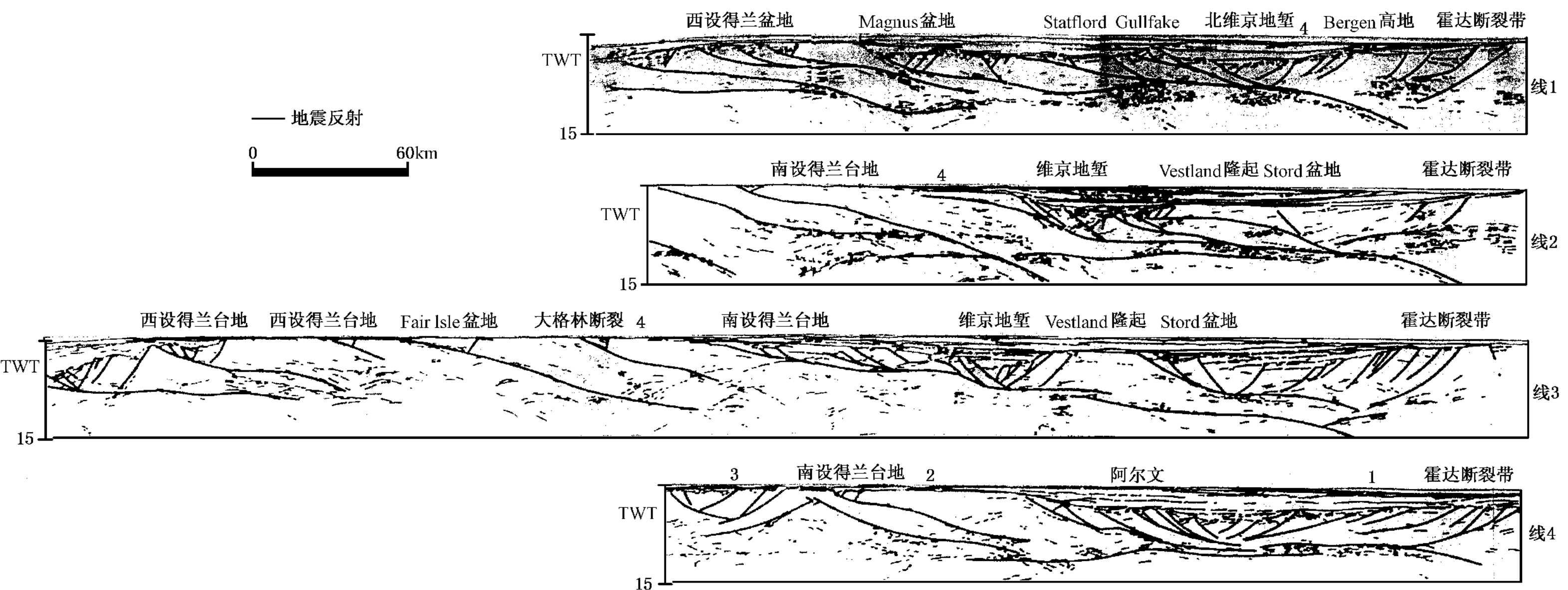


图3-17 NSDP的地质解释剖面图(测线具体位置见图3-16)

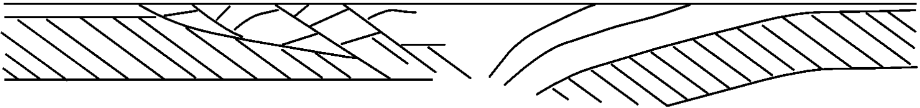
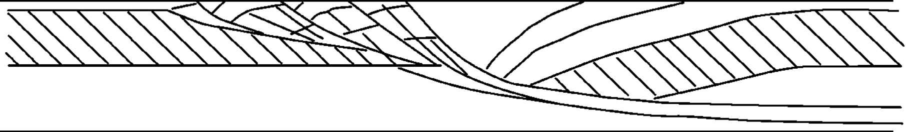
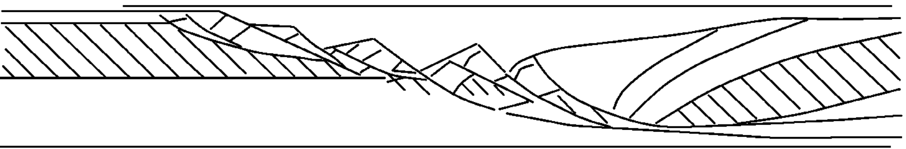
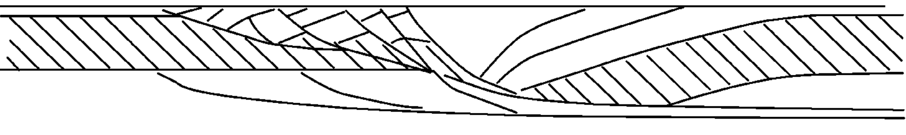


图 3－18 掀斜陆块顶部受侵蚀的相连张性断层系的计算机平衡模式







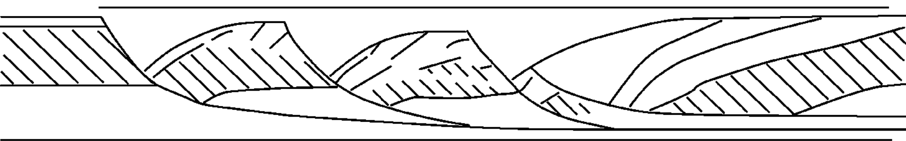


图 3－19 相连系统中第二组张性断层叠加的计算机模式

很明显，勘探战略及勘探计划的实施将受这两种不同地质区实质性评价的影响，类似地，大西洋边缘的勘探也可能以该模式为指导。Tankard 曾将这种看法作了扩展，他靠类比分析推测了北大西洋沿岸构造发展及勘探潜能。

依据深成区域地震资料的分析，对北海发展提出了简要发展的模式，但对这个模式的检验还有赖于更多的勘探和工业开发资料的综合及对日益严密的地壳平衡剖面方法的运用和资料积累。热模拟技术及其他地球物理研究仍然是建立几何构造模式所必须的。来自该区周围可利用的深成地震资料表明，在地震资料上看到的大部分张性盆地为不对称的而且具有相同的构造样式。因此上面列出的那种盆地模式必然是具普遍意义的。因而将深成地震剖面技术及构造模式技术应用到具有相似的地质历史发展地区的研究，定会在各地区取得应有的经济效果。

北北海深成地震剖面特征（图 3－20）表明霍达（Horda）地台为一稳定的障壁，而且加里东基底和霍达地台掀斜断层及维京地堑的形成具有重要的意义，解释中还注意了导致前白垩系倾角增大的走滑带的存在，地震反射剖面为北部北海掀斜断块的形成模式提供了证据。

英国地质调查所油气研究人员，利用已有地震、钻井、测井等资料编制了英国北部大陆架地区所有的主要地层层段的层速度等值线图，建立了该区便于应用的基本速度资料，这对深反

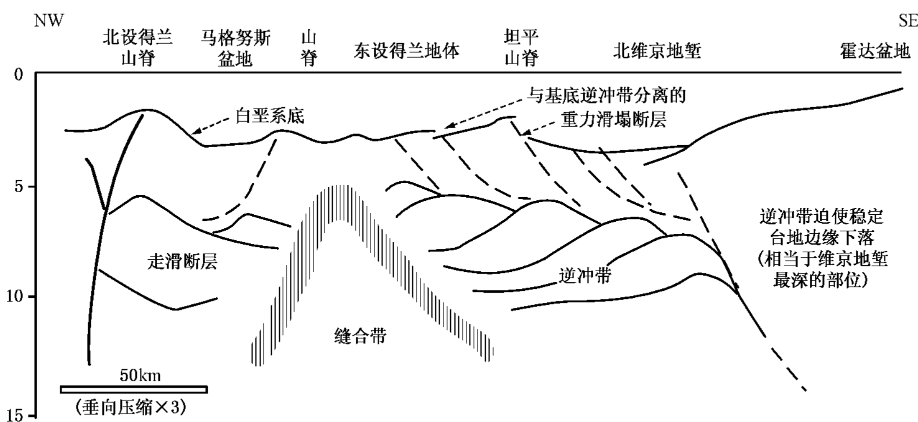


图 3—20　北部北海深层地震反射剖面的解释(据 Beach,1986)

射剖面再处理过程中以及在钻井密度小或没有钻井的地区预测速度参数方面非常有用。它直接反映该层段地层中的岩性均匀程度,能用来分地层。为了实用,将英属的北部北海的主要生产盆地划分为:内默里湾(Maray Firth)盆地,外默里湾盆地、中央地堑、南维京地堑、东设得兰和北维京地堑盆地以及西设得兰盆地等部分。每个盆地的资料分别编录,基础资料取自每口井的速度测井曲线,这些资料输入计算机,对每口井资料长片应记录有水深和 K、B、高程等数值。每层段还要列出:(1)到层段顶部的单程时间;(2)层段传播时间;(3)到层段顶部的深度;(4)层段厚度;(5)层段速度。速度值标于图上井位处,对每个层段速度相对埋藏深度逐点进行转换算出,然后作等值线图。

每个点的速度值显示出很大的差异,这是由于每个点上岩性、孔隙度、侵蚀、压力、深度和构造历史变化的差异而显示的速度变化的复杂特征,它们对速度/深度的关系都具有直接的影响。某些点显示出近直线的关系,这使得埋藏深度曲线易于确定,而其他资料点分布较为随机,需要考虑这些点的岩性和其他因素造成的影响才可能做出合理的解释。

英属的北部北海范围,加里东或更老的变质基底之上有厚度 0～10000m 的盖层,时代从泥盆纪到全新世。综合已有的地质、地球物理及钻井、测井等资料提出了该区的基本构造格架(图 3—21)。构造格架是作了大量简化的区域汇编。例如,南维京地堑西侧,这里表示为连续的断裂边缘,而 Johnson 和 Dingwall(1981)认为将其解释为是以一系列雁列式半地堑断层为界更为合理和符合实际。

对各层段的速度资料进行分析和研究之后,自上而下描述如下:在所获得的古新世之后层段的速度资料(图 3—22),该层段从海底向下取值,因此包括了上覆于部分第三纪层序之上的第四纪到全新世沉积。在研究区的大部地区,它由始新世和渐新世层序组成,但在主要盆地的中部它也包括中新世和上新世的层序。该层段厚度在默里湾盆地为 0m,到中央地堑厚达 3000m,岩性多种多样,由胶结程度低的砂、粉砂和粘土的互层组成,区域上层速度的变化很小:1800～2000m/s,而且在大多数盆地显示出随层段厚度增加即呈近直线增大(图 3—22),一个值得注意的例子是在中央地堑区这种趋向明显相反,这似乎与该层段经常记录到高浓度的天然气(C_1—C_4)的影响有关。速度减小可能部分归结于盐穹隆的存在或是更为广泛的存在超高压产生的影响。但总的来说,该层段岩性变化对层速度的控制非常有限。

作为古新世层段顶部的速度突变点(图 3—23)在整个研究区时代只能是大致相同。因为该层段缺乏全区统一的标志层。该层段为以砂、粉砂和粘土的互层沉积为特征,并含少量煤、

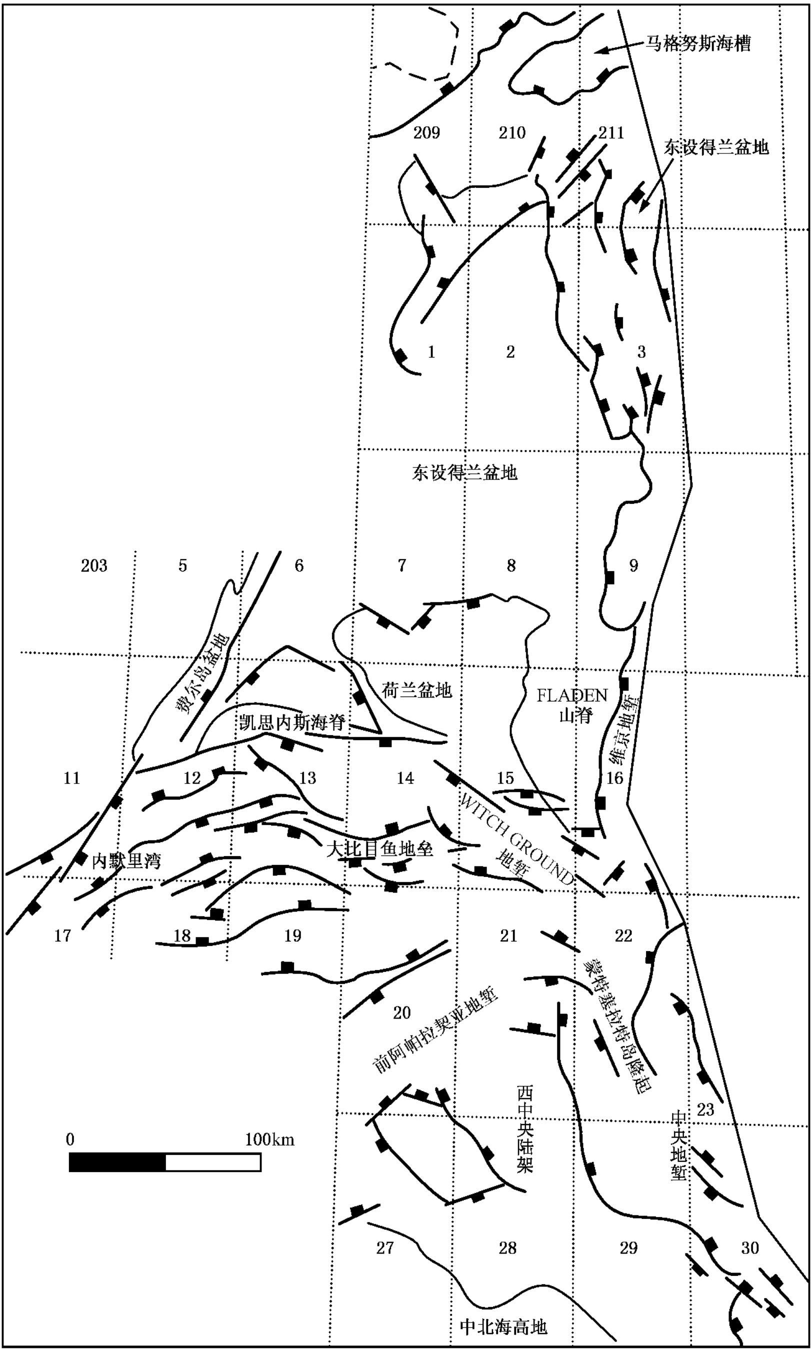


图 3－21　北部北海英属区构造格局简图

褐煤和凝灰质沉积物，该层段一般厚度约 900m，最大厚度可达 1800m。在西北部该层段含玄武熔岩和少量细粒的 Erlend 火山复合体的侵入岩，该处速度大大增高。该层段层速度的范围较宽；为 1800～3500m/s，但仍显示出随埋藏深度呈线性增加的特征。

上白垩统层段通常顶底界线划分良好（图 3－24），唯在该区北部，一些地方有缺失。该层段厚度相当均一，最大厚度约为 1900m，几乎完全由白垩组成，含少量页岩层，现有资料表明在

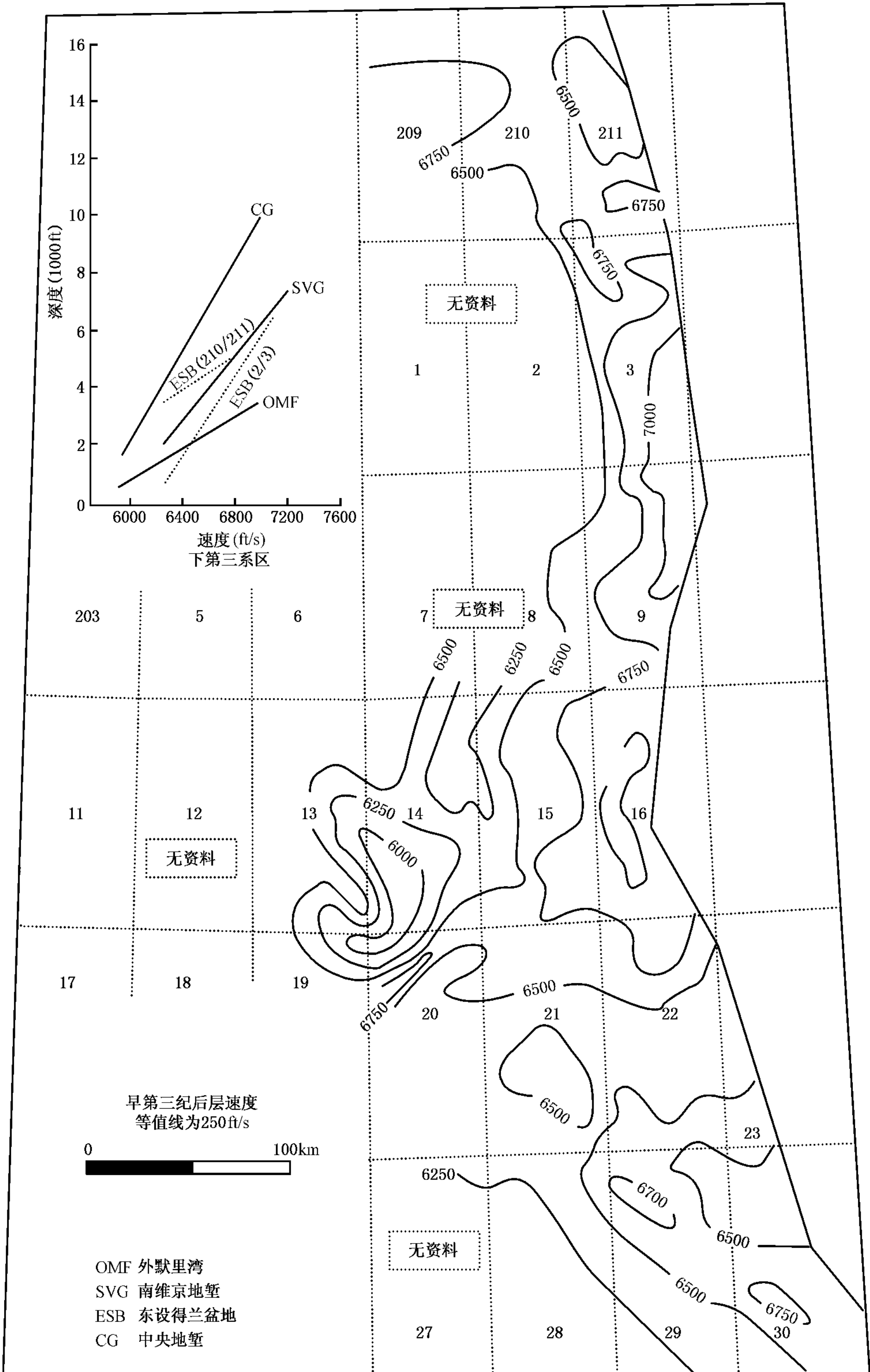


图 3－22　古新世后的层速度图

注：1ft＝0.3048m

古新统层速度
等值线为250 ft/s

OMF 外默里湾
SVG 南维京地堑
ESB 东设得兰盆地
CG 中央地堑

图 3－23　古新世层速度图

注：1ft＝0.3048m

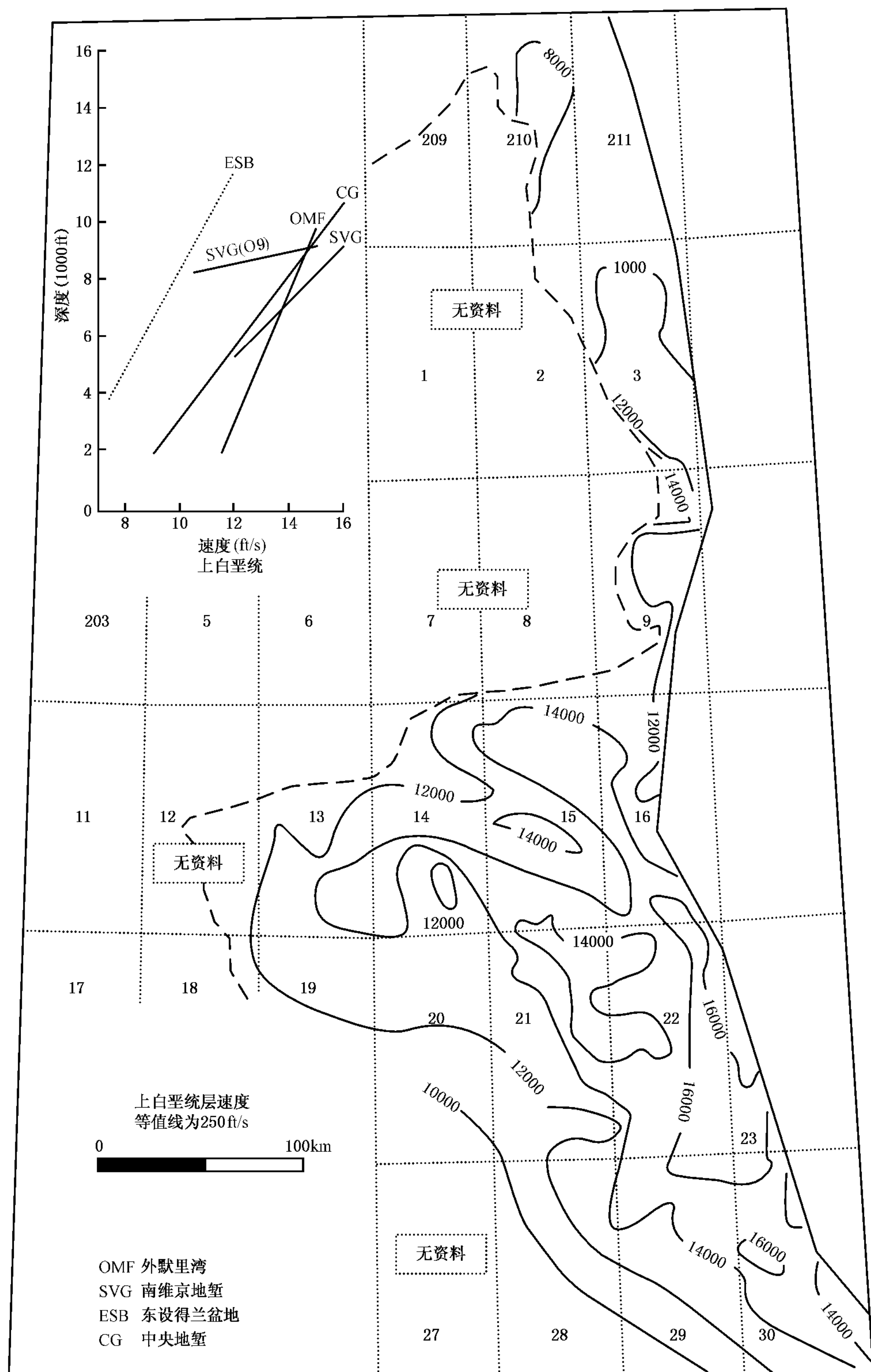


图 3－24　**上白垩统层速度图**

注：1ft＝0.3048m

图 3－25　**下白垩统层速度图**

注：1ft＝0.3048m

图 3－26 **北部北海侏罗系层速**

注：1ft＝0.3048m

9 象限出现岩相过渡带，岩性逐步变为以灰泥质岩石为主，另一处变化发现于 209 象限 Erlend 复合体的东南部，那儿火山活动导致了流纹岩层序的堆积。这些岩性的差异在层速度分布上得到反映，以白垩为主的层段显示高的速度，范围达 3600～5100m/s，过渡带的岩性层速度范围仅为 1800～3500m/s。尽管如此，它们与埋藏深度都有良好的对应关系。下白垩统层段（图 3－25）在整个研究区均有分布，厚度变化大，许多地区的沉积作用受断层的控制，厚度为600～750m，在基底隆起处变薄到仅数米，最大厚度在默里湾盆地见有 1150m 的粘土质砂岩，该层段岩性变化大，由砂岩和钙质泥岩相组成，含少量浅海环境下沉积的灰岩，但受相控制。在相同的深度，层段显示速度从 2700m/s 变到 4500m/s。这归结于侧向相变：砂岩和灰岩降到低速的粘土岩、页岩和灰泥岩。图上标出的分布状态显示出高速区发育于近盆地边缘的位置和盆地内突起，这是由于边缘断层发育，沉积了厚的砂岩和砾岩层序或发育碳酸盐岩为主的层序，与之相反的盆地低速区是由于超压和相变的结果。

限于资料只能概略地画出整个侏罗系的层速度图（图 3－26），该层段的厚度和分布类似于下白垩统，厚度变化很大（即 0～1800m）。岩性也有变化，但层速度范围变化相当小，为 2400～4200m/s，尽管局部具快速的变化，但在区域图上不能表示出来。启莫里阶粘土相的低速特征（即 2400－3000m/s）常占该层段的主要部分，甚至当它含高速熔岩时也是如此，它主要是发育在较粗颗粒沉积的地层，速度才显著的增大，例如在南维京地堑的布雷（Brae）碎屑岩中。在岩性变化较小的盆地区（特别是在设得兰盆地和北维京地堑），速度和埋藏深度间存在着紧密相关的关系。

前侏罗系层段的速度记录资料稀少，因此难于作层速度等值线图，只能将资料汇编成表。在一般情况下，这些平均值的偏差是小的。到目前为止还没有办法对资料作进一步分析。

通过上述讨论对于了解北部北海层速度的基本变化情况有了一个概括的认识，编制的由侏罗纪—第三纪的层速度等值线图，显示了区域上某些地质特征和区域上演变的主要趋向和特征，虽然在某些方面，由于制图比例尺的限制失去了某些细节特征，但总体说来，大部分主要特征和发展趋向显示还是良好的。在复杂的地质环境下，留下了对层速度资料变化产生影响的深刻印象。而且它对了解深部地质情况方面能起到一定的作用。

第二节　地层和沉积古地理

北海盆地北部二叠纪之前的地层资料很少，据目前已掌握的资料看，仅在本奇油田钻遇泥盆纪老红砂岩；在帕普油田钻遇石炭纪地层；在阿盖尔和奥克油田中打到赤底统。即使有这样一些局部的地层剖面，由于缺乏完整性、系统性，在区域上更无对比资料，因而，对二叠系以前的地层情况仅能根据已有资料在地层简表中（表 3－2）加以简述。重点叙述二叠系及其以后地层的沉积特征和古地理概况。

一、早二叠世地层——赤底统

在北海地区早二叠世地层称为“赤底统”（Rottiegeudes），是一个古老的德国矿工用语。典型的赤底统沉积序列充填在以英国东部到苏—波边界延伸约 1500 km 的华力西晚期盆地中，这个盆地被称为南部二叠系盆地。地震测量和海上钻探已证实在北海盆地北部林克宾芬隆起以北的范围内，存在另一个小得多的赤底盆地，一般称为北部二叠系盆地；另在默里湾盆地中亦有赤底统沉积。

表 3—2　地层简表

地　　层		岩　　性	油气层位	厚度/m
第四系		泥岩夹砂岩		
第三系	上新统中新统 渐新统	以泥岩为主夹有粉砂岩、钙质和藻层白云质灰岩		600～1500
	始新统	泥岩夹厚层砂岩	区域良好储层	300～880
	古新统	泥岩、砂岩为主	区域良好储层	200～600
白垩系	晚	白垩沉积为主夹有泥岩	区域良好储层	500～1200
	早	以泥岩、页岩夹碳酸盐岩组成	良好生油层	0～1000
侏罗系	晚	主要为泥岩夹少量砂岩	区域性生油层	0～700
	中	以砂岩为主，局部夹泥岩	区域重要储层	0～310
	早	上部泥岩为主，下部以砂岩为主	良好区域储层	0～580
三叠系		上部以杂色陆相泥岩夹粉砂岩为主下部以厚层砂岩为主	局部为良好储层	0～2100
二叠系	蔡希斯坦统	蒸发岩、碳酸盐岩及页岩沉积为主	已知油气层，具有一定分布范围	0～1010
	赤底统	风成砂岩为主，到盆地中央则以泥岩为主		1～490
石炭系		砂岩、页岩夹煤层，局部见石灰岩	南部北海盆地主要气层，局部见气显示	0～580
泥盆系		老红砂岩	局部为油层	0～1006
加里东			基底	

赤底统可分为两个有显著差异的单位，即上赤底统和下赤底统。下赤底统以火山岩的存在为特征，而上赤底统未见火山岩。下面分统叙述之。

1. 下赤底统

下赤底统主要是以火山岩为特征，且含一些沉积层的岩石组合。尤其在德国（Falke，1972；Plein，1978）主要是处于潮湿和干燥气候交替的河流和湖泊环境中。风成砂岩也有产出，且在部分地区具有良好的储集性（Schnererolingen 砂岩，Drong 等，1982），该套地层在北海盆地北部分布非常局限，仅见于德国北部奥斯陆地堑——Bamble 海槽区和苏格兰、北海北部的林克宾芬隆起的某些侧翼地区。

下赤底统碱性—中性火山岩的分布与已知的或推测的断层紧密相关，这表明它们的成因可能与最早的拉张运动有关。这种拉张运动不但形成了二叠系盆地，而且产生了北海的（维京地堑、中央地堑、奥斯陆—霍恩地堑和德国的 Schnererdingen 地堑）地堑系。如果这种解释是正确的，那么北海地堑系在华力西造山运动的最终几幕或紧接其后就已开始形成，这与晚石炭世维斯法晚期伦敦—Brabant 台地上隆和斯蒂芬期北海中部隆起最早的正向运动相一致。

在晚二叠世蔡希斯坦海侵以前，北海中部隆起大部地区被剥蚀掉所有先前沉积的石炭系地层；而相邻的中央地堑，侵蚀作用已达泥盆系的老红砂岩甚至比这更老的地层，说明上隆更大；这些事实说明石炭纪末至二叠纪的垂直运动规模不同，而且还相当复杂。

2. 上赤底统

上赤底统由 4 个不同的相组合而成。这 4 个相被解释为河流（河道）环境、风成环境、萨布

哈环境和湖泊环境的沉积物。在不对称的南部二叠系盆地不但广泛分布，而且研究较详细，在北部北海盆地分布不广，研究程度也差。

在默里湾盆地和北部二叠系盆地中，上赤底统岩相分布尚不完全清楚（图 3—27）。在盆地较深处，很少钻遇该统，除靠近默里湾沿岸的 Elgin 外，在露头上未见到该统地层的出露。现有证据表明，该两个盆地可能包括与南部二叠系盆地中已被认识到的同样沉积相带的岩石（河流、风成、萨布哈相），而层状湖相岩盐为 Fraserburgh 组（Peegan 和 Scull，1975）。在典型地区的大部分奥克层系被解释为风成砂丘相沉积。地层倾角测井资料说明该区的风向与南部二叠系盆地相反（即向东和东南）。典型地区的奥克组底部有 14m（图 3—28）是砾岩质的，并含有石英岩和片岩岩屑的地层。在 Shell Esso21/11 井岩心中，Frasorburgh 组页岩含白云质和云母质砂岩条带，这些条带具有硬石膏质粘结的波痕，其沉积环境解释为萨布哈沉积边缘的砂丘组，明显地与南部二叠系盆地中的 Leman 砂岩和 Sliverpif 泥岩层序相似。相同的剖面已在挪威钻井中见到，但未定名（图 3—28）。在北部二叠系盆地赤底统厚度变化很大，使得剖面对比相当困难。

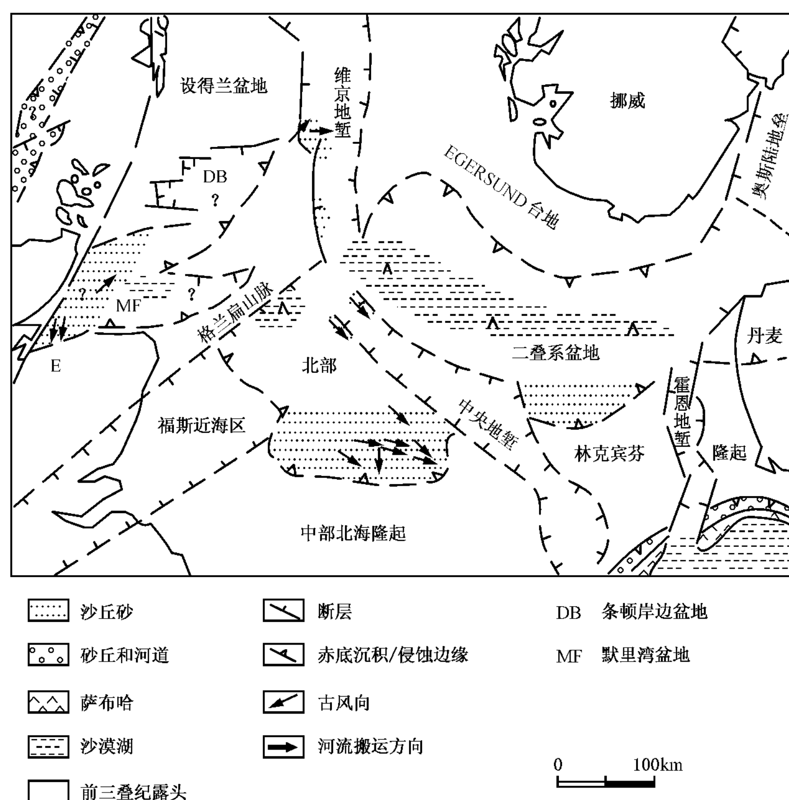


图 3—27　北部北海盆地下二叠统（赤底统）相分布和风向

在默里湾盆地中，赤底统的沉积与盆地下沉速度相一致，上覆的蔡希斯坦统保持了浅海相沉积。而在北部北海盆地早二叠世的中心沉降速率可能大于沉积速率，致使其后的蔡希斯坦统主要是盆地盐岩相（Taylor，1981）。与此同时，在南部北海盆地，大到足以形成底辟构造。在苏格兰的默里湾沿岸，距 Elgin 北约 200 英尺（60m）的砂岩，局部称为 Hopeman 砂岩（Peacock 等，1968）。具有某些生物爬行迹，推测属早三叠世或晚二叠世。层理产状表示当时风向

图 3－28 北部北海盆地英属和挪威海域钻井剖面中赤底统地层区域变化概貌

为南或南东向，该砂岩下部层理明显，向上层理不明显，渐变为无构造岩层。这种无层理和其他无构造砂岩的形成可能是由于水快速驱替空气导致颗粒间的差异运动，除去了层理的结果，在北部北海二叠系盆地中铜页岩层底面上的变形构造大量出现，这说明是蔡希斯坦海浸导致了水面上升，由此可见赤底统沙漠无疑曾低于全球海平面。

蔡希斯坦统地层虽在默里湾盆地的陆地部分未见出露，但从钻井和地震两方面的资料证实，在离陆地仅几公里的滨岸地区是存在的（图 3－29）。因此在该盆地边缘的默里湾风成砂体可能持续了比以前认为的时间更长。因为目前在滨岸带的赤底统砂岩还达 600m 厚。

图 3－29 默里湾一带上、下二叠统地层之间的关系（示意）

3. 赤底统沉积史

从石炭纪煤系地层沉积时的潮湿气候向赤底统沉积时的干旱气候的变化，极可能是劳亚古陆相对向北漂移造成的。已有资料说明在北海南部二叠系盆地于二叠纪早期已进入了贸易风沙漠带。在北部二叠系盆地中从其沉积情况看，沉积特征与南部二叠系盆地有相似的特点，

它们都位于近赤道的北纬度区，与现今北非—阿拉伯沙漠位置相同，只是其风向在北部与南部有所不同(图 3—30)。

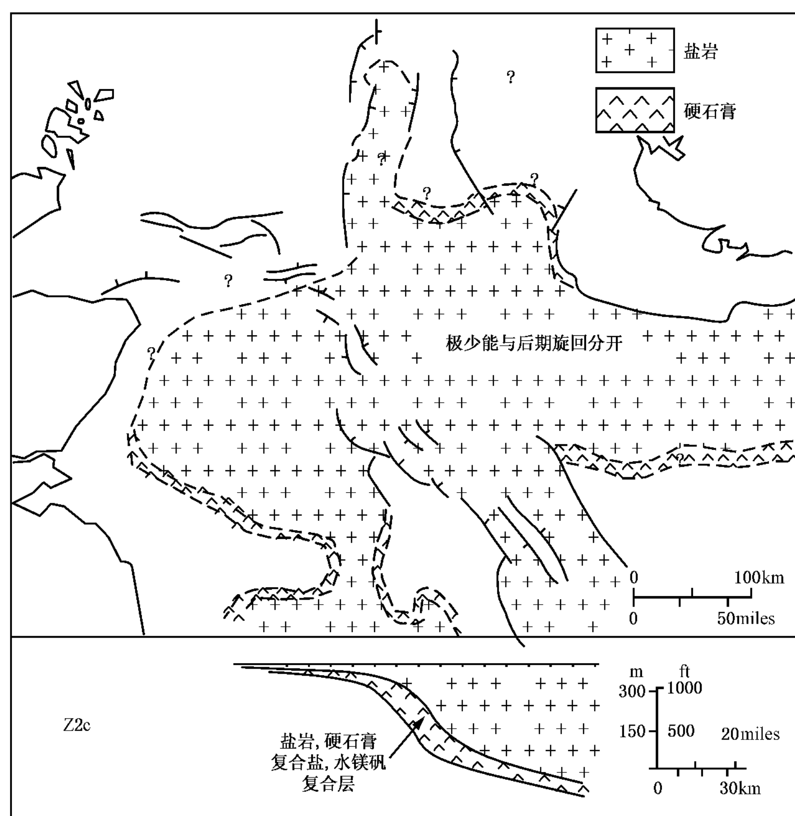


图 3—30 欧洲西北部(主要为北海一带)二叠纪时所在纬度及当时风向示意图

钻井资料与英格兰 Purham 采石场揭露的极好风成砂体露头说明，许多赤底统砂丘可达 50m 或更大高度。现代风只能形成最大高度 5～10m 的小型纵向沙丘。约 100m 高，1 或 2km 波长的阿拉伯和北非现代大沙丘，可能形成于更新世。这种大小悬殊的可能原因是与主要冰川活动形成的大面积高气压区(二叠纪至白垩纪及更新世)有关。从而可能引起了全球高气压带向赤道集中，形成了比目前间距更小的高、低气压带(图 3—31)。这种状况下产生的风力可能较为现代风强烈，也较现代风寒冷。这种解释已为许多学者所赞同(Galloway，1965；Bowlew，1976；Krimley 和 Smith，1981；Rea 和 Janecek，1982)。更新世时期的风可能不同于今天的状况，不是只刮几小时或几天就停止了，而是持续一年中的很大一部分时间。二叠系砂丘与冈瓦纳大陆上的冰原就如更新世冰川一样，其形成规模在今天是不可能达到的(Glennie，1983，a、b)。

如果这些推断是正确的，那么，早二叠世的沙漠风可能是强烈的，也是非常干燥的。因此，这些砂丘活动区在冈瓦纳冰期已经扩大，而且强蒸发作用已使沙漠湖减小到最低限度。另一方面，早二叠世冰川作用的干化阶段，应与一般的弱风系相一致。这个弱风系是产生较高对流引起降雨和减少蒸发作用的原因。这可解释为在蔡希斯坦海侵之前相当长期的湖相和萨布哈相横向延伸的某些特点(图 3—32)。

在石炭纪由于晚维斯法期南北向挤压导致北海南部边缘华力西高原的形成和与此相关的

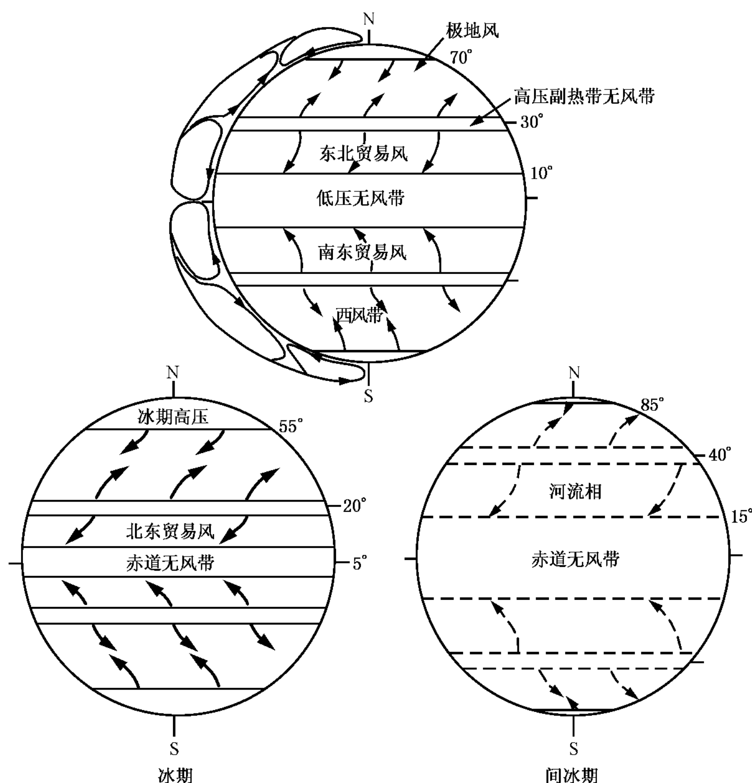


图 3－31　极地冰盖规模大小与地球气压带宽度和部位的差异示意

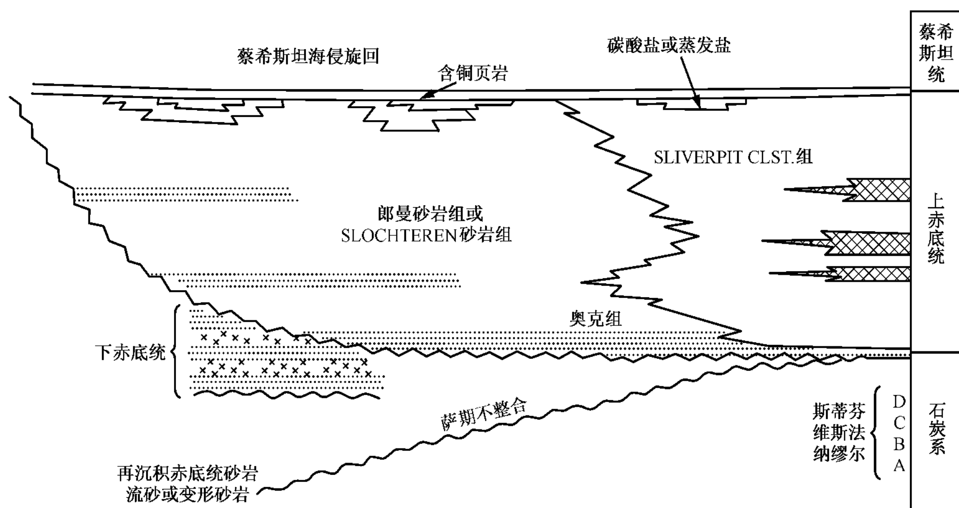


图 3－32　二叠系上、下赤底统岩石—地层区域剖面，打点区代表河道砂岩或河道砂与风成砂混合

右旋剪切运动在 Solepit 区发生回返。在北海西部华力西盆地的早期塌陷和地堑系的发展，可能与初始古大西洋断裂系密切联系。而且引起北海盆地东西向拉张和右旋扩张运动，这种运动导致北部和南部北海盆地的沉降，仅剩下北海盆地中部作为相对稳定的残山成为一个构造高地，同时也导致北西—南东向雁行式次级盆地的发育，如 Sole pit 和 Broad Fourteen 盆地，

这两个盆地直到晚中生代还保持持续沉降的特征。同样东西向区域拉张运动推测是引起北海南北向和北西—南东向断裂系即奥斯陆(Oslo)和霍恩(Horn)地堑、维京(Viking)和中央(Central)地堑在早二叠世和石炭纪末发育的原因(图 3—33)。下赤底统火山岩见于霍恩地堑和中央地堑的中部北海隆起翼侧。这些沉降盆地在蔡希斯坦期加深到足以使盐类聚集,其厚度之大为其后的刺穿构造的发育准备了物质条件(维京地堑南部和中央地堑)。这种作用可与地堑的翼部对照,在翼部,早蔡希斯坦期地层局部缺失,而晚蔡希斯坦地层发育成完整的浅海碳酸盐岩或硬石膏相。

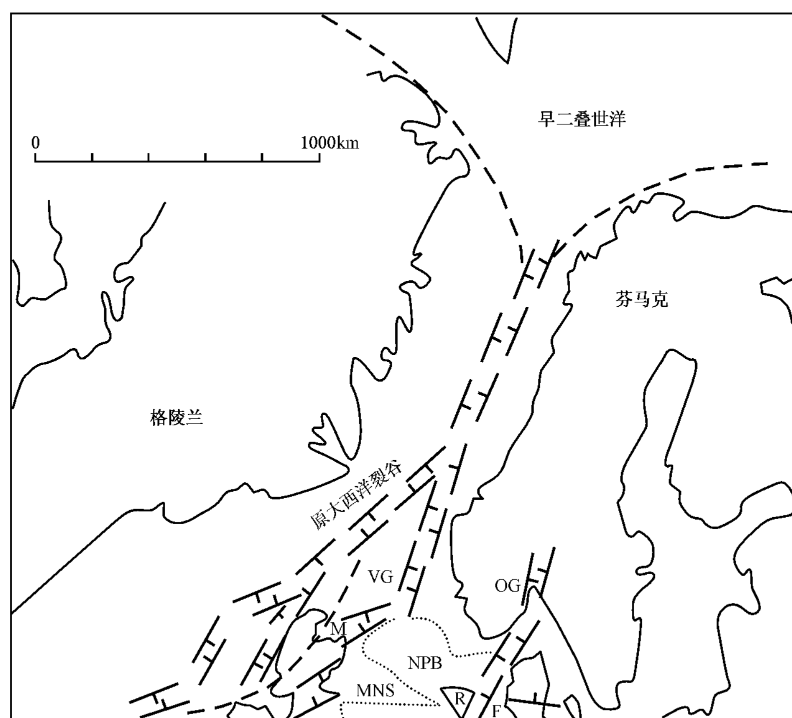


图 3—33 晚二叠世断裂系及古地理概貌

CG—中央地堑;HG—霍恩地堑;M—默里湾;MNS—中部北海隆起;NPB—北部二叠系盆地;OG—奥斯陆地堑;RF—林克宾芬隆起;SPB—南部二叠系盆地;VG—维京地堑

在早二叠世地层,最上部的"Weissliegend"沉积物中含有蔡希斯坦海侵的重要证据,这就是在此处而不是在后面章节讨论这次海侵的原因。蔡希斯坦海侵被认为是沿着原始大西洋和北海裂谷系的结合部位进行的。海水是从二叠纪时的开阔洋经格陵兰北部海岸和挪威海岸之间的某个地方流进来的(参见图 3—33)。现有资料说明,原始大西洋裂谷要么是一个狭窄的地堑如图 3—33 所示,要么是一个较宽阔的大洋臂状海湾。

蔡希斯坦海侵可能是和二叠纪冰期结束相一致,全球性海平面上升,使大西洋水沿先期存在的拉张断裂系流动。北部和南部二叠系盆地可能为开阔海的海水淹没,直到蔡希斯坦海平面与当时的大洋洋面一致为止。

根据现有资料分析,当时赤底世沙漠湖的水面低于开阔洋洋面 250m,那就需要约 35000km^3 的水充满北部二叠系盆地,不计漏失和蒸发,若以 50km^3/d 的速度注入(即 10km 宽,20m 深,平均流速达 3m/s 的海峡)。则需要几年的时间才使北部北海盆地充满水,这种水流的注入可能冲刷起沙漠湖早期沉积物,这些冲蚀物被带入盆地;而在湖的另一边侵蚀作用是

极弱的，这些砂丘表面只受到有限的波痕再改造。故其原始沉积形态仅有轻微改变，相当大的地貌高地保留了下来。因此，试图以含铜页岩为一水平基准面来详细对比赤底统储集层是不可靠的。

二、晚二叠世——蔡希斯坦统

蔡希斯坦统地层是蒸发岩和碳酸盐岩的复合体，该层在北海和欧洲西北地区广泛发育（图3—34）。很明显，它与美国特拉华（Delaware）盆地的瓜达卢普（Guadalupian）和奥霍（Ochoan）两地层为同期沉积物，它们的特征甚为相似。由于该统地层造就了世界上“巨型盐体”之一，故有人把该统的沉积范围也称为蔡希斯坦盆地。它为其他厚层蒸发岩系的成因也提供了新的认识。蔡希斯坦统地层可明显地分为5个沉积旋回（表3—3）。

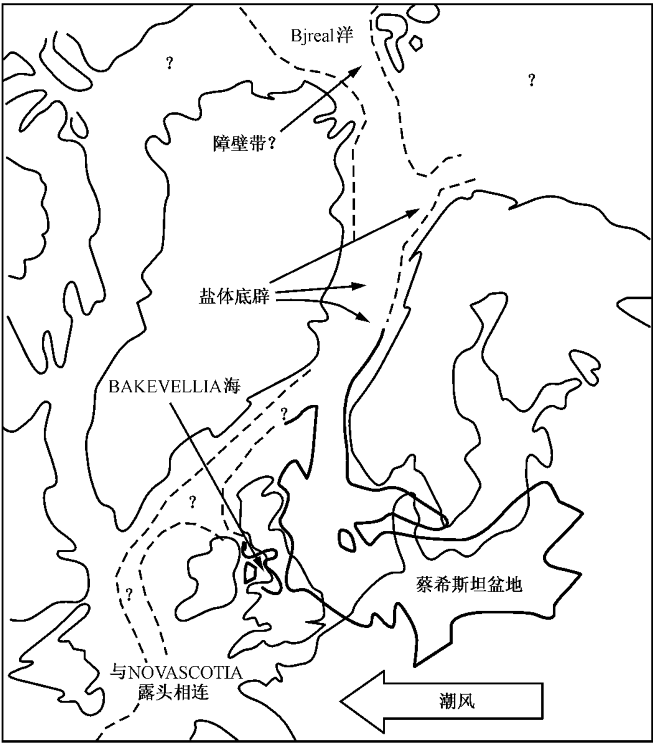


图3—34　蔡希斯坦盆地在北海及西北欧一带的发育情况

（与北大西洋区漂移前的关系）

根据挪威的特罗姆斯（Troms）盆地中取得的资料（King，1977），推测蔡希斯坦统地层可延至北纬75°，再向北的分布就更不清楚了。蔡希斯坦盆地被北海中部的林克宾芬隆起（Ziegler，1981）分成两个走向为东西的次一级盆地，即北部北海盆地和南部北海盆地。在林克宾芬隆起上，蔡希斯统地层大部分被剥蚀，仅有少量残余体，厚层岩盐占据盆地中心，而碳酸盐岩和硬石膏多分布在边缘地带和中部北海隆起之上。地震资料表明北部北海盐盆从苏格兰前缘河口到达丹麦的北部，在挪威—丹麦盆地和其他局部地区，该层厚度一般大于2000m，如图3—35所示（Taylor，1981）。但钻井深度未达到的地区限于资料还不很清楚（图3—36）。

南部北海蔡希斯坦统地层的主要岩性岩相特征，已进行过详细描述和研究，证实了南部盐盆的5个沉积单元，并做出了模式，该模式在勘探中很有用。并认为这种模式可应用于北部北海盐盆（Taylor，1981）。

表 3—3　蔡希斯坦地层名称及对比

		英国		南北海 法国，荷兰， 丹麦，波兰	旋回
旋回	群	约克群区	达拉汉区		
EZ5	ESKDALE	含盐灰泥 （二叠系上部泥灰岩）	含泥灰泥岩组 顶部硬石膏组	Zechsteinletten Grenzanhydrit	Z5
			Sleights粉砂岩组		
EZ4	STAINTON-DALE		Sneiton岩盐组 Sherburn硬石膏组 Upgang组	Aller Halit Pegmatitanhydrit	Z4
			光卤石灰泥岩组	Roter Salzton	
EZ3	TEESSIDE		Boulby岩盐组 Billingham主要硬石膏组	Leine 盐岩 Hauptanhydrit Plattendolomit	Z3
		Brotherton组 （上Magnesian灰岩）	Seaham组	Grauer Salzton	
EZ2	AISLABY	Edling组 （二叠系中部灰泥岩） Kirkham Abbey组	Fordon蒸发岩和Seaham残积层 Hartlepool 和 Roker组	Stassfurt蒸发岩 Basalanhydrit Hauptdolomit Stinkdolomit Stinkkalk Stinkschiefer	Z2
EZ1	DON	Cadeby组 （下Magnesian灰岩） Hayton硬石膏 Sprotbrough段 Wetherby段 灰泥岩页岩段	Hartlepool硬石膏 Ford组 （中Magnesian灰岩） Raisby组 （下magnesian灰岩） 灰泥岩页岩段	Werraanhydrit Werradolomit & Zechsteinkalk Kupferschiefer	Z1

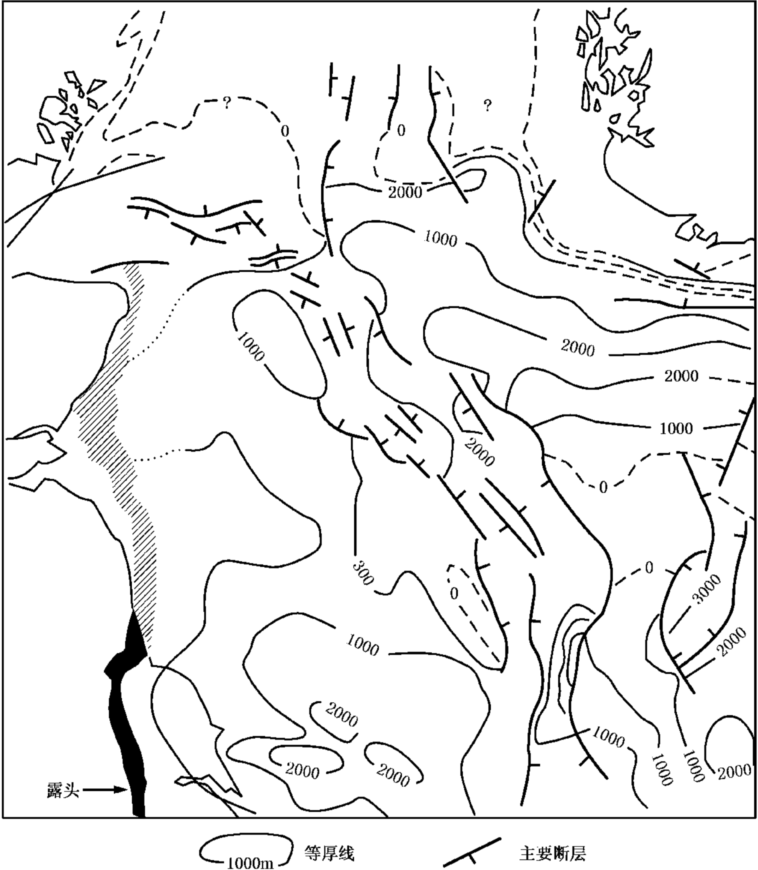


图 3—35　北部北海盆地蔡希斯坦统等厚线综合图

（据 Taylor，1981 修改而成），等厚线间距是不相等的

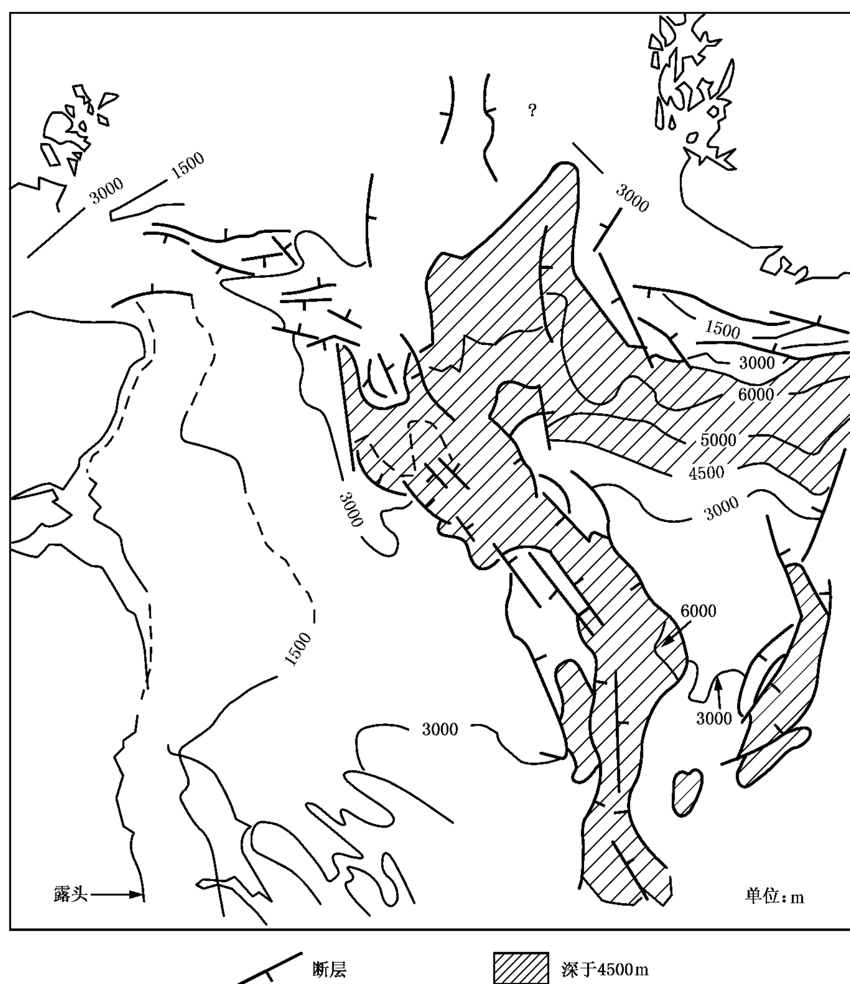


图 3—36　蔡希斯坦统底面构造图

蔡希斯坦统地层由于受潮风带的影响气候热而干旱，因而，在当时大陆区，形成了 5 个蒸发岩旋回。这种旋回系列反映了由于蒸发作用使盐度增加，接着又为海水的再次入侵，所以每一旋回都是从薄层碎屑岩开始，向上依次为石灰岩、白云岩、硬石膏和岩盐，最后沉积的是高浓度的含镁、钾(卤水)的盐类，这种相互叠置的旋回可能是由于全球性海平面变化的影响(也许有大的冰川作用)。障壁的存在也增强了这种叠置情况的发生。一旦它们被暴露，蔡希斯坦盆地里面的蒸发作用大于海水补充甚至没有补充造成水面下降。

在该时期每一次海侵，形成各种类型的近岸相、均匀的细颗粒坡相和盆地相。大多数碳酸盐岩是在氧气充足、温暖的、光线可射入的盆地边缘浅水中快速沉积的，而且早期沉积作用强于沉降作用，造成了广阔的陆棚条件，包括障壁坝、泻湖、潮间带和平坦的边缘(包括萨布哈环境、浅水环境)有利于颗粒岩和生物粘结灰岩聚集，它们通常具有好的原生孔隙度和渗透率，如果早期转变成微晶白云岩，这样就更有利于保护和增加孔隙和渗透率。有些地方存在渗流过程也可使岩石的孔渗性变好，而盆地相的碳酸盐岩为薄层、黑色、压实状、含泥质或粘土质的微晶岩石，多数是浪击面以下形成的，不能作为储层，由于它厚度小，作为生油岩也受到限制，斜坡相碳酸盐岩，是每个楔形体最厚的地方——其成分和结构都介于近岸相和盆地相中间，颜色

逐渐变浅，向上泥质和粘土质减少，由于陆棚区的筛选，该碳酸盐岩中含有生物骨骸，碳酸盐岩浊积物和滑陷物，虽然常发生白云岩化，但由于微晶的晶间孔隙度不好，所以渗透率往往为中等。现以每一旋回特征做些分析。

1. 第一蔡希斯坦旋回 Z_1（图 3—37，图 3—38）

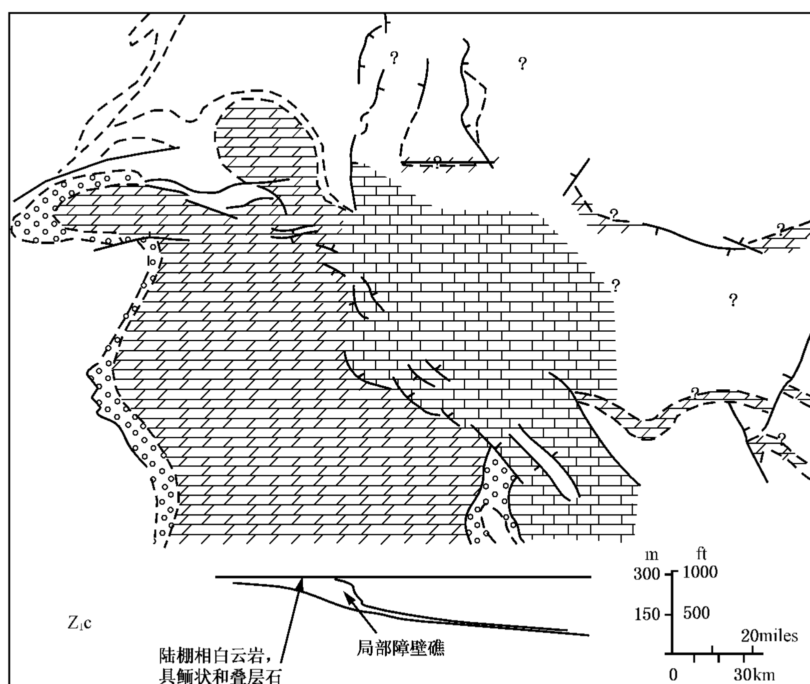


图 3—37 蔡希斯坦统第一旋回（Z_1）碳酸盐岩综合相图

随着未固结的赤底统砂岩被水搅拌和少量再沉积，蔡希斯坦盆地便开始被水淹没，沉积了蔡希斯坦统最底部的含铜页岩（Kupferschiefer）层，其中黑色，仅 1m 厚的腐泥型页岩；可以从伽马测井曲线的尖峰来识别它。该层在浪击面下缺氧环境中形成（虽然并不是每个地方水都特别深），覆盖了整个北海盆地，在南北两盆地的底部都有分布，在默里湾和维京地堑区的一些井中已见该层。但部分中北海隆起上和其他高的地区缺失，特别是赤底统缺失的地方。虽然它富含有机质，但作为生油岩太薄。

含铜页岩层之上迅速变成海相碳酸盐岩——蔡希斯坦统灰岩和 Werra 白云岩。碳酸盐岩，确切的说是泥质、灰质白云岩和灰岩，它们的厚度从盆地中心部分厚 3m 多，到达离沉积边缘 16 ～ 32km 的斜坡相和陆棚相已变成 30m。可分出两个海进—海退亚层序。大陆上与其相当的地层在 Durham 地区为 Raisby 和 Ford 层；在 Yorkshire 地区为 Cadeby 地层中的 Wetherby 和 Sprotbrough 单元。两者在边缘相含有丰富的腕足类、瓣鳃、苔藓虫、海百合和有孔虫动物化石，但向盆地和向上渐少。

礁的存在（苔藓虫—藻礁）并没被叠层石所覆盖是 Z_1 碳酸盐岩的特征。据估计该层也许处于有利的条件下，但至今还没有进行勘探。小的补丁礁存在于 Yorkshire 到 Nottinghamshine 露头的下部亚层。而块状障壁相，高 100m，长度延伸至少有 35km，出现在 Durham 地区的上部亚层中。Durham 地区的礁体在近岸相变成薄层状白云岩和孔隙性鲕状灰岩，在礁周围分布的也是类似的地层。一般点礁占据开阔陆棚相的局部较高的地形部位，通常为下赤底

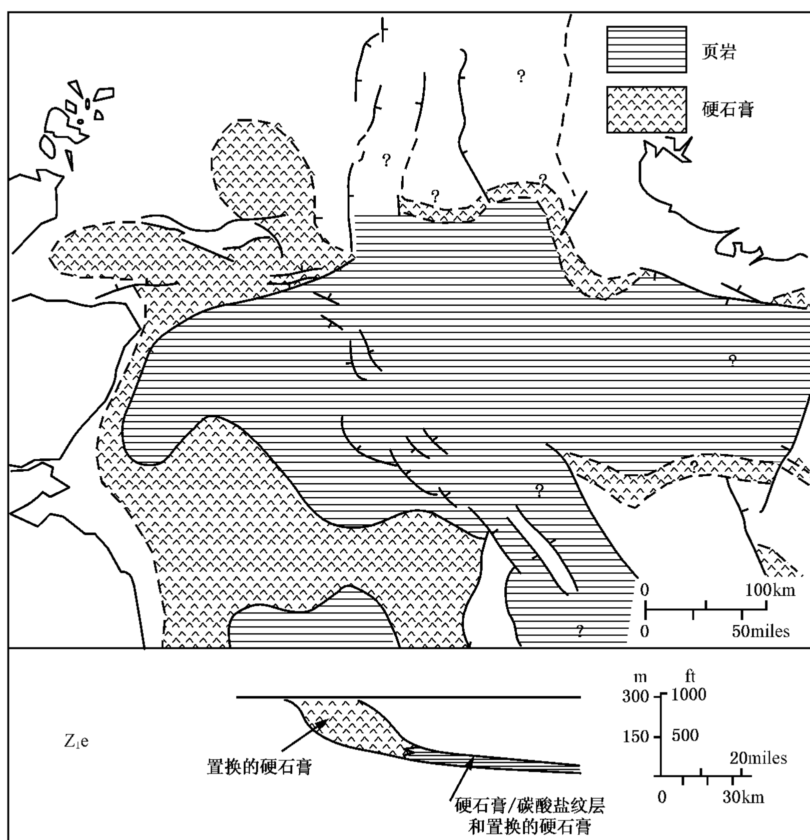


图 3－38　蔡希斯坦统 Z_1 蒸发岩综合相图

统的火山颈(Paul,1980)。中北海隆起为礁的发育提供了优越的条件,Z_1-Z_2 均为浅滩环境。Jenyon 和 Taylor(1983)所取得的地震资料进一步补充了这种观点的证据。

默里湾的西北部有碎屑沉积,其中互层状灰岩、页岩和白云岩厚 90～120m,近于顶部含鲕粒和陆相砂岩沉积,从区域上看可能相当于 Z_1 碳酸盐岩,该层序的下部称为 Turbot 海滩层,在默里湾南部 Lossiemouth 附近的 Hopeman 砂岩中,可以看到蔡希斯坦统初期海侵的影响。碳酸盐岩横向延伸较短。在碳酸盐岩顶部,通常有一层薄而特征明显的泥粒灰岩,含有核形石,常含有孔虫和海百合,该层分布较为普遍。沉积了该层以后,蔡希斯坦盆地便处在一种非正常的海相条件,表现在 Z_2-Z_3 早期陆棚相的生物群发育受到了限制。

由于一个明显的间断和伴随着干燥环境的形成,使 Z_1 碳酸盐岩与 Z_1 蒸发岩(Werra 硬石膏以及同期沉积物)分开(参见表 3－3)。如图 3－38 所示,蒸发岩在盆地边缘形成透镜体,蒸发岩由浅蓝—白色硬石膏组成(具“结核”鸡窝构造、镶嵌构造和肠状带)。该层从中北海隆起可追踪到北部盆地中。在默里湾地区存在相类似的厚层硬石膏,至少其中有一部分与上述硬石膏为同期产物。在盆地中,边缘相硬石膏透镜体厚度仅剩下约 18m,它包括 4 或 5 个亚旋回,向上逐渐变成黑褐到黑沥青色,光滑的、小于 1mm 的硬石膏/碳酸盐岩/灰岩层。随着蒸发作用减弱,这种沉积也相应地减薄(Taylor,1980)。斜坡相的 Werra 硬石膏,在钻井中对其岩样的研究程度很差,对露头上该层各种各样的滑陷构造、块体流动和浊流层特征曾进行过较详细研究。通过这些,可推断出当时盆地水的深度。

2. 第二蔡希斯坦旋回 Z_2（图 3—39、图 3—40）

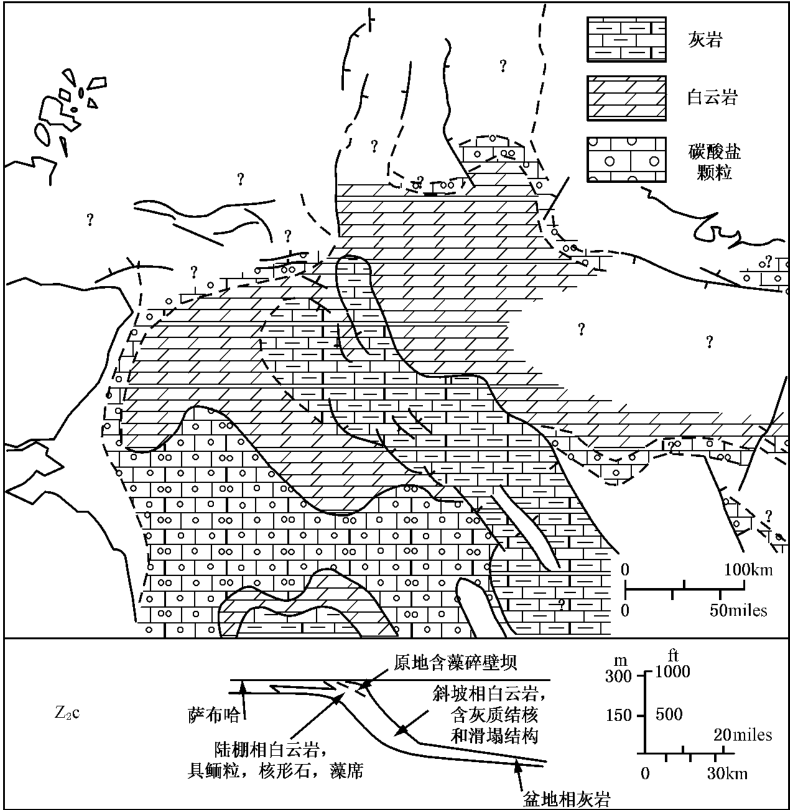


图 3—39　蔡希斯坦统（Z_2）碳酸盐岩综合相图

在北部北海盆地的底部，Werra 硬石膏迅速变成黑褐到黑沥青色薄层状碳酸盐岩。其下部称为 Stinkschiefer，含有许多薄层页岩，伽马测井曲线反映明显。盆地的深部，灰岩多于白云岩，其典型特征是一些大的镶嵌状方解石晶体，可穿过几个细层。虽然富含有机质，但由于早期方解石化的影响，同时厚度太薄（仅 9～18m），因此，对它能否释放大量油气至今还存在怀疑。该旋回（Z_2）由 30～90m 厚的浅水到潮间带白云岩组成，典型的岩石特征为含细小的具淋滤中心的鲕粒和球粒成分。大豆粒和藻席是障壁相所特有的，它们发育在斜坡碎浪带到盆地相之间，生物仅局限于瓣鳃、腹足、有孔虫、介形虫，而没有发现真正的造礁生物，主要是含核形石和鲕粒的障壁相沉积，已经有许多井钻穿 Houpt 白云岩，虽然油气显示频繁，但生产能力常受硬石膏和岩盐堵塞的限制。

Z_2 的斜坡相特征，主要是通过对 Durham 地区的露头观察和 Yankshire 北部和陆上钻井而得出的结果。它主要由灰—褐色白云质泥质岩组成，具粪球粒、生物钻孔，含有介形虫、有孔虫、偶见瓣鳃类。侧向变成含方解石团块的盆地相。孔隙度和渗透率常常不理想。但重力一滑陷的陆棚相沉积在局部地区提供了好的孔、渗条件。Oclark（1980）认为斜坡下部的碳酸盐岩在成岩过程中可产生次生孔隙。

Z_2 蒸发岩主要由盐岩组成（纤硼石盐，图 3—40），它是蔡希斯坦统地层中主要岩层。它覆盖在 Haupt 白云岩之上，侧向上常与前期沉积的盐层和水镁钒合并形成复合体，厚度约为 90m，该层普遍分布着薄层钾盐矿，说明由盐的沉淀所引起的下陷得到了补偿，按照 Day 等人

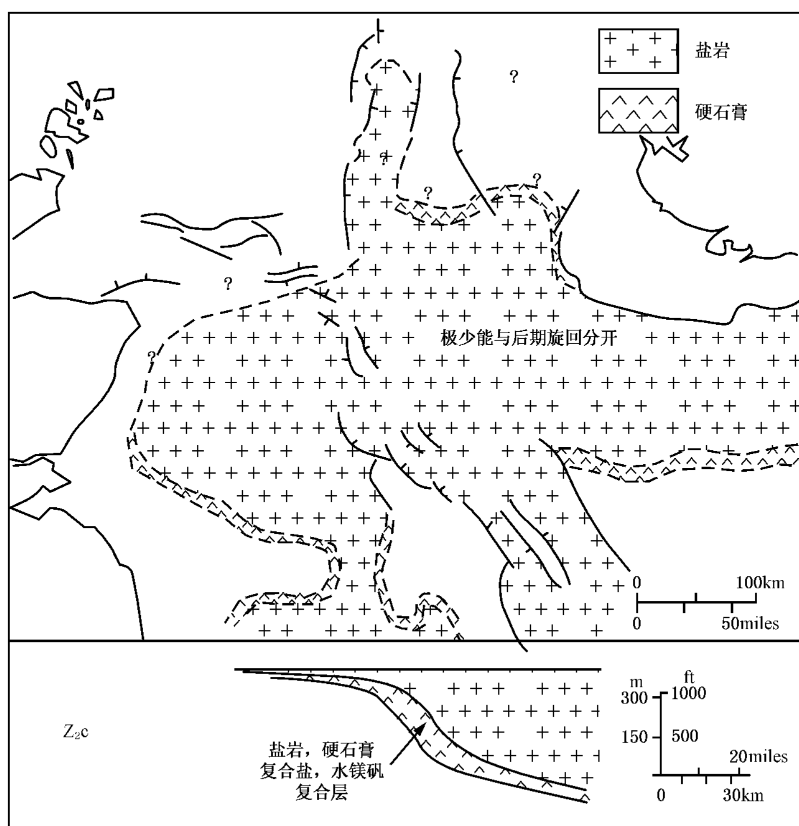


图 3—40 蔡希斯坦统(Z_2)蒸发岩综合相图

(1981)**的观点,Z_2 盐体可能充满了中央地堑,而且穿过了中北海隆起进一步向两侧延伸(见图** 3—40)。**虽然 Z_2 盐层在北海盆地是一个重要的单元,但它与后期旋回中的盐岩不易完全区分开。默里湾缺乏该层,进一步向北到达维京地堑是否有该层还没有资料证实。**

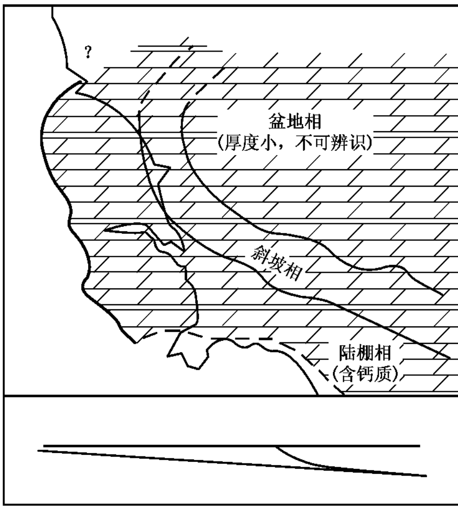
3. **第三蔡希斯坦旋回 Z_3(图** 3—41)

Z_3 **碳酸盐岩**(Platten **白云岩或称为** Platy **白云岩)的研究程度最高,它的同期沉积物在** Durham **地区为** Seaham **层;在** Yorkshire **地区为** Brotherton **层(以前称为上** Magnesian **灰岩)。在盆地边缘,它超复在** 1m **厚的基底页岩之上,它的最大厚度为** 75～90m。Platten **白云岩形成于浅水环境、水静,已发现有一富含藻的障壁带,它是一个典型的萨布哈旋回,它的顶部由富含藻的岩层和结核状硬石膏组成,再向上为** Haupt **硬石膏(主要是硬石膏层),到盆地中心变为白云岩和** Haupt **硬石膏相间互层。**

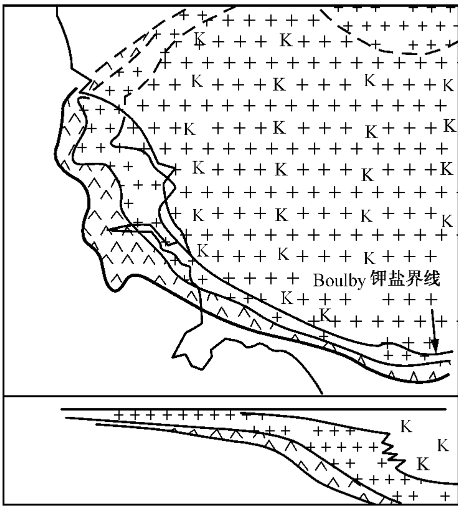
在北部北海盆地的好几口井中,发现一套页岩—白云岩—硬石膏层,但这套地层是与中北海隆起、默里湾或维京地堑 3 **地区的** Platten **白云岩层还是** Haupt **硬石膏层相对比尚搞不清楚。蒸发岩是在一个非常浅并逐渐抬升的环境下沉积的,被含藻、含岩盐和钾盐的红色地层所覆盖,在盆地的有些井中,可见其同期沉积物。岩盐之下的厚层混合钾盐的存在说明它与南部盆地第三旋回相似。**

4. **第四和第五蔡希斯坦统旋回 Z_4 和 Z_5(图** 3—41)

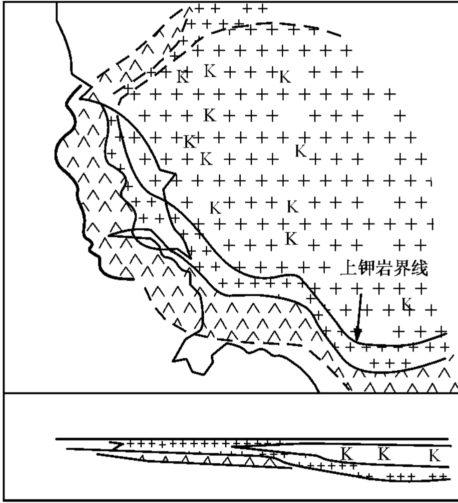
在 Durham **地区薄层致密状白云岩或称为菱镁矿层代表了第四旋回的海侵基底,但该层的海相特征远缺乏证据。紧接着,沉积了上部石膏层,也称为** Pegmatit **硬石膏,分布较广泛,**



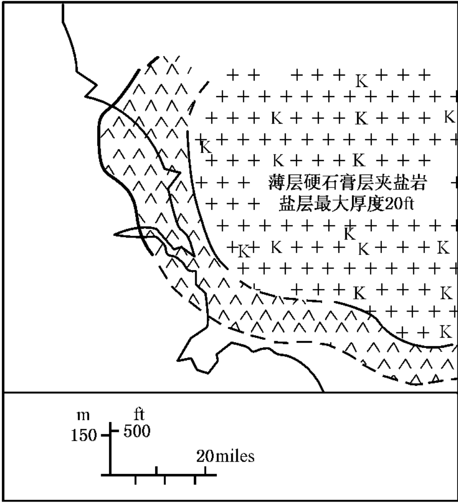
Z_3c



Z_3e



Z_4e



Z_5e

主要岩性：K 钾盐　岩盐　灰岩　页岩　硬石膏　白云岩　砂岩　碳酸盐颗粒

图 3－41　蔡希斯坦统 Z_3 碳酸盐、蒸发岩及 Z_4、Z_5 蒸发岩综合相图

该层一直延至挪威水域以北地区。上部岩盐层占据面积较小，在中北海隆起以北的林克宾芬隆起上是否有该层的相应沉积物还难以确定。

薄层红色泥岩把第四和第五旋回分开，第五旋回主要由硬石膏层（或称为顶部硬石膏层）组成，在北部北海盆地其同期沉积物是 60m 厚的硬石膏层，在挪威水域的一些井中，由页岩和白云岩组成。

5. 盐体动力学的分析

在盆地内一些地区，蔡希斯坦盐层的厚度至少有 130m，上覆地层厚 900m 或更多，虽然盐体的底辟作用在盆地边缘不明显，但盐体构造还是常见的，从盐体构造排列情况看，大多数与区域走向一致（见图 3－42）。底辟作用可能是由于盖层的断层运动触发引起，虽然局部一些

底辟作用发生较早，有的是在侏罗纪甚至在早三叠世就已产生了，但多数底辟作用的发生似乎与晚期的启莫里阶运动有关。当盐体一旦受到外力的触发，在上覆地层负荷的不均衡作用下，盐体就会产生从高载荷的地方向低载荷的地方运动。差异抬升伴随着下陷，上升部分被剥蚀，则在临近的“边缘向斜”或“边缘凹陷”中再沉积。这种不平衡现象越来越严重，底辟作用也随之加强。Trushein(1960)通过对勘探井中盐体构造的研究，认识到了盐体运动的特征，盐基随埋藏深度的增加，盐体呈枕状、柱状其后发展成拉长的墙状。图3—43绘出了盐体构造发育的各阶段。

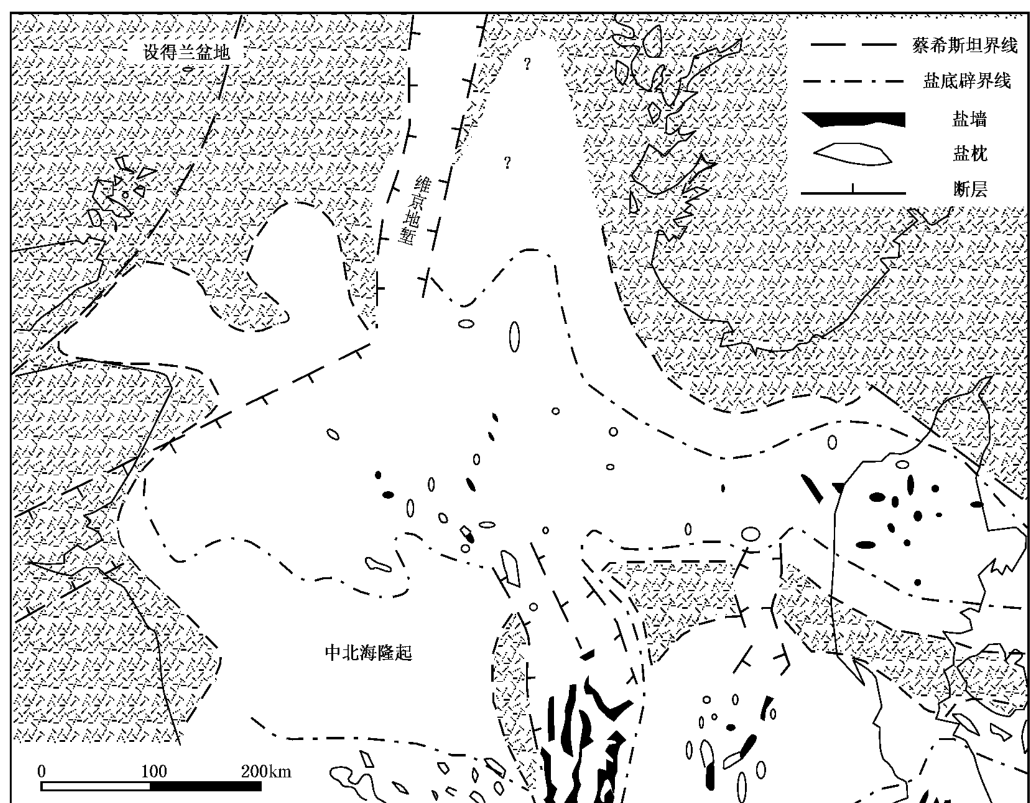


图3—42 蔡希斯坦统盐体底辟分布区

(据Toylor,1981,有修改)

在大型底辟的周围，由于盐体与围岩突变性的接触，为石炭纪油气向蔡希斯坦统地层中储层运移提供了良机，图3—44说明由于上覆地层负荷抬升的不均匀，可明显看出在上白垩统沉积之前，右边盐体从下侏罗统就已开始抬升。而右边盐枕在白垩系沉积过程中才发生运动。但是从早三叠世沉积以后，盐体就开始不断的运动，只是运动的不均衡性当时不明显。从图上还可看出，脆性的Platten白云岩没有沿至大型盐枕之上，盐体最厚处Haupt白云岩明显地向上抬升，这种“假构造”(速度上拔)是由于岩盐的层速度比周围沉积物高得多而引起的。图3—45中，两个相邻的底辟发育明显，从它们侧翼的下陷部分可以推断出其发育阶段。在右边的盐枕中，三叠系基底层仅有少量张性断层，而右盐枕的顶部则出现大断层，断面两边盐体相对垂直运动，由于溶解，上覆地层发生垮塌。到三叠纪中期，两底辟之间的盐层完全外运。在图3—46中，盐体流动形成了一个盐墙，盐墙的宽度达3km。从翼部侏罗系的抬升和侵蚀造成的构造关系来看，盐枕的形成时期在早白垩世，但盐体运动从三叠纪持续至今，但从盐墙右翼

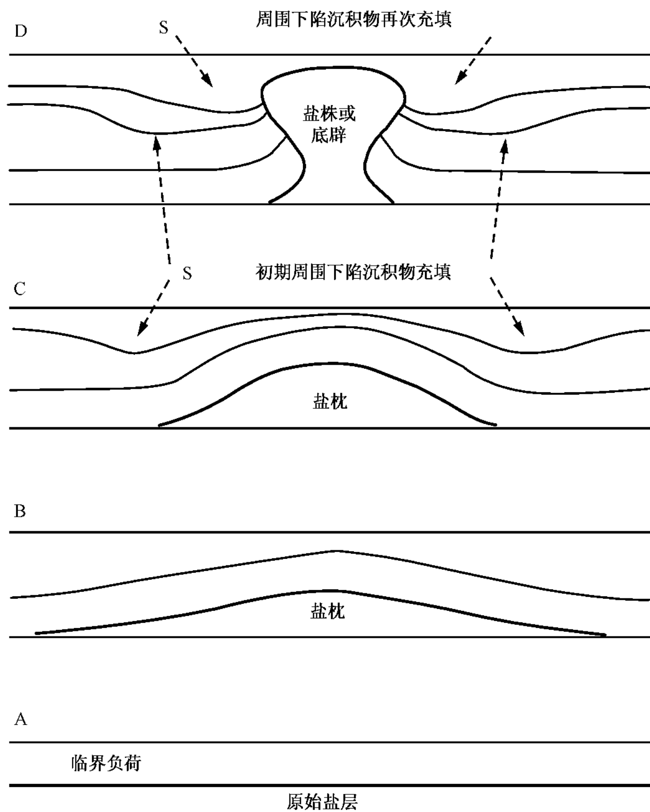


图 3－43　盐体运动发育模式图

A—盐体运动之前；B—随着上覆载荷的增加，盐体向内流动形成平缓盐枕。一旦发生这种情况盐枕顶部和两侧的沉积载荷就不平衡；C—随着盐体从翼部向斜区或周围下陷区回缩，新的沉积物不断补充给翼部，促使盐体向中间流动；D—最后盐体刺穿上覆沉积物形成底辟或岩株岩墙，形成各种各样的剖面形式。随着原
始盐层的连续回缩，翼部下陷就会不断发展

缺失盐层来推断，可能目前运动已经停止。盐墙的左边底辟作用是在白垩纪以前的构造背景上形成的，但仅从地震剖面上来看，情况要复杂的多。

常规地震资料处理中，由于信号的衰减，常常出现高陡构造，如应用反向模拟技术和叠加技术，便可清楚的反映出底辟翼部的特征，甚至出现轻微的上突情况也同样可以解释出；但这种技术没有应用到实际例子中，因而，有些问题尚搞不太清楚。

6. 旋回的鉴定方法

在蔡希斯坦统地层中，由于相似沉积相在旋回中的重复，层序又不完全，鉴别单独的旋回相当困难（特别是很难说出多少层是存在的，而哪些层不存在），例如在 Yorkshire 的边缘地区，蒸发岩与碳酸盐岩无法分开，在盆地中心页岩、碳酸盐岩无法区别。仅仅应用测井曲线和录井资料进行研究，也有许多困难（由于钻井返回地面的仅是些相互混杂的岩屑。当钻入坚硬层时，溶洞中的岩块随时都会混入钻屑中，例如红泥岩常常成为 Werra 硬石膏顶部的假岩屑）。而详细的微体化石、孢粉和地球化学研究可能解决这些问题。火山灰条带的微观痕迹也许在认识 Z_1 的相互关系中有特殊的用途。当然在碳酸盐岩层序中，可以通过放射性向上减弱这种特征来识别旋回，因为这仅反映了海退的特点。如果存在各种海相生物群，特别是包含有

腕足动物、海百合和苔藓动物时，常为 Z_1 碳酸盐岩；相反，如果岩石主要由 Calcinema 的柄组成则为

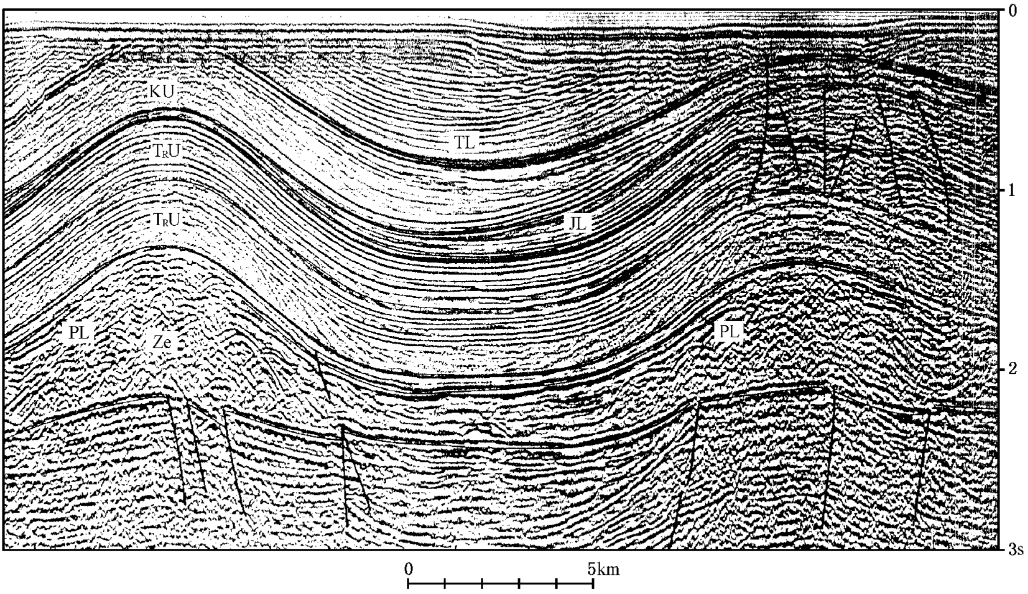


图 3—44 北海地区的地震剖面，反映了盐枕开始的不同时间

(垂直比例尺为双程时间，单位为 s)

PL—Platten **白云岩**；TRL—**下三叠统**；TRU—**上三叠统**；JL—**下侏罗统**；KU—**上白垩统**；

KL—**下白垩统**；TL—**下第三系**

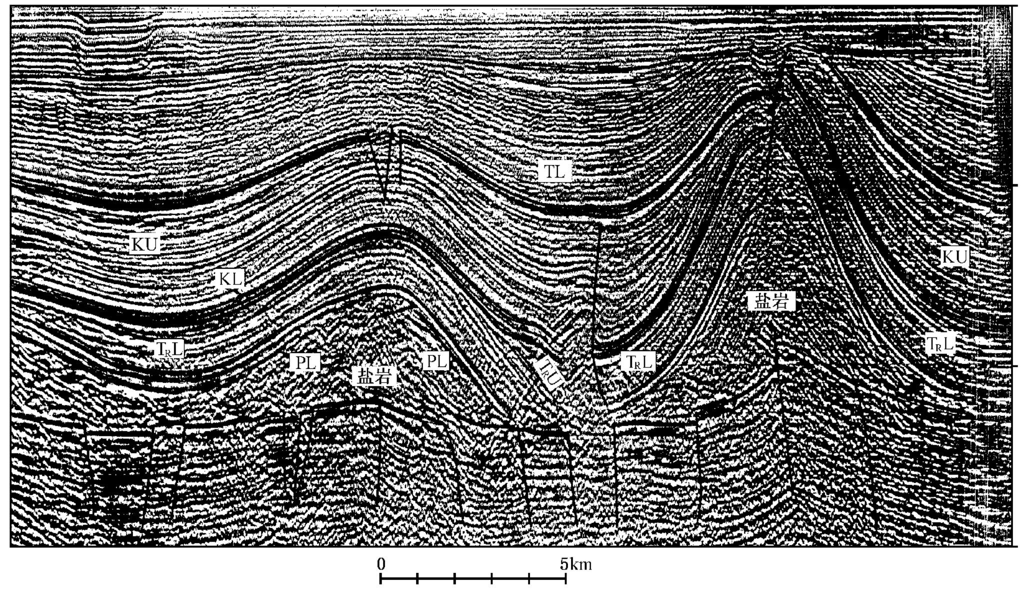


图 3—45 北海地震剖面，反映了第三纪中期末，由于盐体的完全回缩对边缘向斜的影响和盐体底辟的发育情况(代号同图 3—44)

Z_3。**复合盐是** Z_2 **中最常见的含钾矿物，但在钻井岩屑中常变成石膏。**Z_3 **和** Z_4 **这样盆地相的蒸发岩含光卤石和红色泥岩比早期两旋回丰富得多。表** 3—4 **中列出了最常见的蒸发岩矿物的测井响应特征，也可用线性程度法做定量计算**(Ford **等**,1974)。

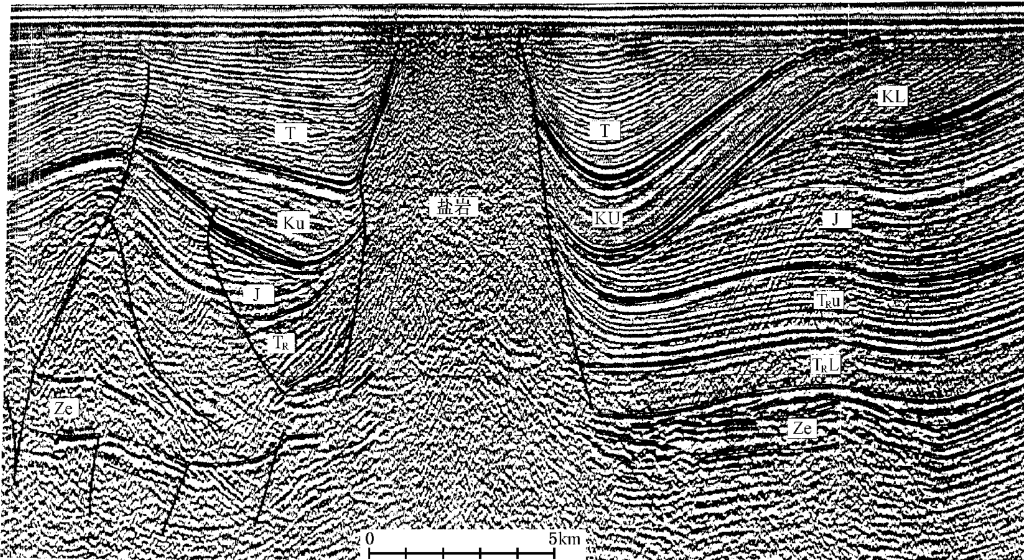


图 3—46 北海地震剖面，反映了盐墙的发育情况（代号同图 3—44）

表 3—4 常见蒸发岩矿物的测井参数

矿 物	视密度 (g/cm^3)	声波时差 ($\mu s/ft$)	视石灰岩中子孔隙度 (%)	伽马射线 (API)
盐岩($NaCl$)	2.03	67	0	0
硬石膏($CaSO_4$)	2.98	50	0	0
石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)	2.35	52.5	49	0
复合盐($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2H_2O$)	2.79	57.5	15	180
光卤石($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	1.57	78	65	200
钾盐(KCl)	1.86	74		500
水镁石层($MgSO_4 \cdot H_2O$)	2.55			0
钾盐镁石($4(KCl \cdot MgSO_4):11H_2O$)	2.12		45	225
无水钾镁石 $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$	2.82	52	0	275

注：石膏的稳定性小，在 610m，很少遇到，在此深度下则变成硬石膏

三、三叠系地层

北海盆地的三叠系既缺乏重要的烃类聚集又缺乏母岩，不同于下覆的二叠系或上覆的侏罗系。撇开这些纯经济方面的考虑，三叠纪毕竟是地质历史中的一个重要时期，泛古陆的分裂使得在西北欧建立了一个全新的构造格架。这次分裂是以沿着早期的大西洋轴发生地壳变薄和裂开以及特提斯的向西扩张而开始的。由于控制整个中生代沉积作用的地堑体系叠加于上，从而使由二叠纪继承下来的构造格局受到了改造（图 3—47）。在北海盆地重要的新构造单元是维京—中央地堑。北—南北走向的构造长逾 1000km，穿过老的北部二叠盆地并插入中北海——林克宾芬隆起，该隆起又被迅速下沉的霍恩地堑所穿插。在东侧，以断层为边界的挪威—丹麦槽地是另一快速下沉并堆积了巨厚三叠纪沉积的处所。值得注意的是，伴随这一裂谷期的火山活动仅只出现于中央地堑与中北海隆起交汇处以及挪威的西南部（Ziegler，1978）。

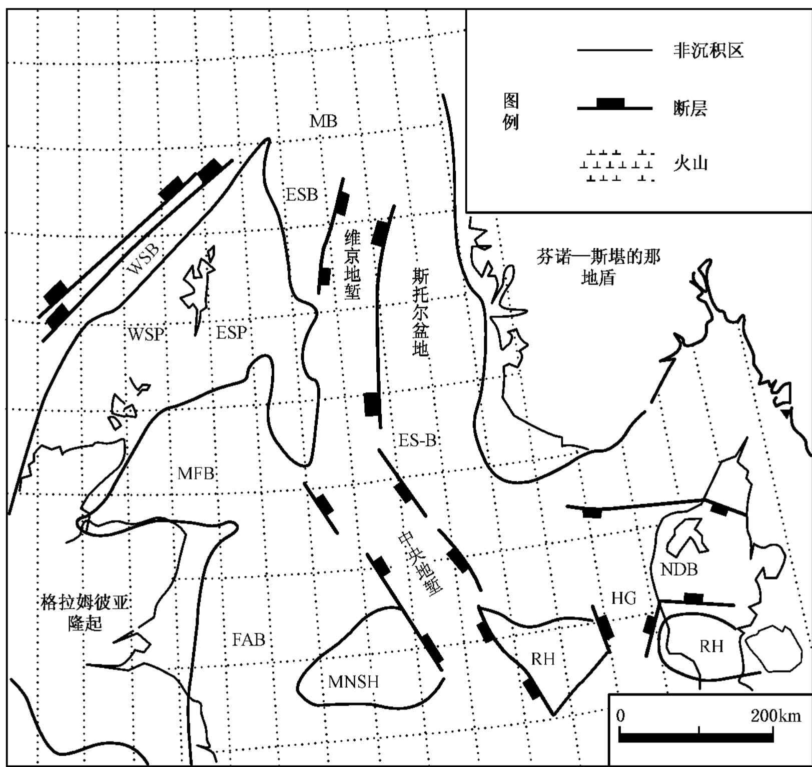


图 3—47　三叠纪时期的主要构造概貌(据 Brennand 和 Ziegier,1978)

WSB—西设得兰盆地;ESB—东设得兰盆地;WSP—西设得兰地台;ESP—东设得兰地台;
ES—B—伊格尔桑次盆地;HG—霍思地堑;FAB—费斯阿普罗切斯盆地;NDB—北丹麦盆地;
MFB—默里湾盆地;MB—摩尔盆地;MNSH—中北海隆起;RH—林克宾芬隆起

广布的海相沉积作用随着二叠纪的结束而结束,转为以非海相为主的沉积环境。伴随着蔡希斯坦海从北海盆地的逐渐撤出,形成了一套海陆交互相环境的沉积,只要三叠系覆盖了二叠系最上部地层,就会呈现为明显的整合关系,不过经常有相的突然变化。在中北海—林克宾芬隆起的北部,三叠纪的区域构造格局对沉积作用的控制有着颇为重要的作用。在某些次级盆地中,一些主要构造幕与更局限地区性事件一起,导致形成向上变粗的旋回系列,相的侧向连续性也差。北部盆地发展中构成重要因素的另一构造影响是盐运动。二叠系盐岩的活动,起初是由于哈迪森(Hardegsen)构造运动,尔后则是由于上覆地层负荷的压力造成的。而且这些构造事件对控制沉积作用也有重要影响,应从全球海平面变动的角度来考虑。由于三叠纪时期受全球海平面逐渐上升的影响,因而在整个北海盆地三叠纪沉积主要是红层,包括冲积扇、河流相、风积相、萨布哈相、湖相以及浅海相等的产物。沉积相的丰富多彩以及它们的内部关系,在很大程度上取决于构造背景,在构造活跃的断陷盆地中,冲积扇将直接进入盐湖或其他盆地中心环境。在自然起伏低缓的较稳定盆地中,边缘冲积扇则可能以宽广的泛滥平原而与盆地中心环境隔开。关于三叠系地层为什么是红层众说纷纭,Turner (1980)曾评述各种流行的假说,认为 Walke 等(1978)所描述的在沙漠砂质冲积物中有铁镁矿物在沉积后发生退化作用从而形成赤铁矿色素,铁镁矿物是由碎屑氢氧化铁提供的。

三叠系红层的对比,由于缺乏作为标志的菊石和双壳贝组合,而陆相对比中常用到的脊椎动物残体又很稀少,因而传统的岩性地层对比一直在使用着。在南北海盆地沉积物侧向连续

性很好，使用岩性对比地层很有效，但是在中北海—林克宾芬隆起以北的各盆地中岩性地层对比却很少能有满意的结果。在台赛（Tethyan）和波瑞（Boreal）省所建立的孢粉带是这里最奏效的对比手段。近代的发展是利用可资鉴别的碎屑粘土矿物组合作为对比的手段，用此方法在西阿普罗赤（Western Approaches）对比单调而不含化石的泥岩层序，曾获得了令人满意的效果（Fisher 和 Jeans，1982），此项技术目前已成功地用于北部北海盆地的地层对比。

三叠系的地球物理特征记录在南北海盆地是相当清晰的，但在北部北海盆地中则变得具有较多的推测成分。

三叠纪的沉积层序曾被 Phys（1974）描述过，所提出的岩性地层划分在南部北海可自然地划分为两个群。在北部北海盆地，由于研究程度低，要与南部盆地进行对比，目前尚比较困难。

在中部北海—林克宾芬隆起以北的原北部二叠盆地相当位置的范围，于三叠时期，发育了中央地堑和霍恩地堑，切割了中北海—林克宾芬隆起，构造运动又使三叠纪时期地形恢复了起伏，在连续下沉的盆地中充填了旋回性碎屑物，并有为量不多的蒸发岩。在霍恩地堑堆积了厚4000m 的三叠纪沉积，在中央地堑则是 2000m，在埃格尔桑（Egersund）准地堑也是 2000m，在北丹麦盆地堆积的三叠纪沉积厚度更大，都超出上述数字，估计那里的三叠系可达 6000m（Kent，1975）。由于没有区域标志层，地层中含孢子花粉少，因而，在北部北海盆地中只能划出两个岩性组合。

1. 斯密斯班克（Smith Bank）组

本组代表盆地型沉积，主要由粉砂质泥岩组成，偶含砂岩薄层和石膏薄层。向盆地东北边缘，砾岩层发育，而靠近林克宾芬隆起则砂岩薄层变厚、连续性变好，本组底部普遍有一稳定的海进型砂质单元，与下伏的蔡希斯坦统呈明显整合接触。本组下部有一褐色细至中粒砂岩与红色、绿色页岩交互成层，被称为约瑟芬段。

有关中央地堑北部三叠纪沉积的详情，一概来自 Q—1 井，这里有厚逾 300m 的粗碎屑物被作为斯密斯班克组的代表。但在这地堑的南部沉积作用的格局接近于南部北海盆地。按 Jacobsen（1982）和 Michelsen 与 Andersen（1983）所描述的层序，与贝克顿群相对应的层位主要是微红褐色，偶呈粉砂质的膏质和钙质粘土岩，含少量粉砂岩和砂岩。杜辛白云岩组的对应层位由鹿特盐岩和莫金卡克盐岩的代表所组成，或者是由白云质粘土岩与石膏互层所组成。杜吉昂含盐组的对应层位也包含有盐岩，与克尤波尔盐岩段相当，但侧向上可变为灰色泥灰岩，白云岩和石膏。本组的其他部分主要为红—褐或绿—灰色钙质粘土岩，垂登石膏组的对应层位是混杂的红—褐色和绿—灰色粘土岩，夹一石膏质单元。后者可与克尤波尔石膏段对比，三叠系层序以瑞替期的暗灰色粘土岩而告终，整个三叠系厚达 2000m。

在历经了三叠纪快速沉陷和裂谷作用时期之后，整个三叠纪时中央地堑是一个相当稳定的构造单元，然而当三叠纪沉积快结束时蔡希斯坦统中的盐岩运动开始了。此后差异沉陷加剧并且也变得更加广泛了，粗屑的三叠纪沉积物局限于中央地堑的北部，这意味着北部比南部更显著的地形起伏。中北海—林克宾芬隆起的南翼被逐层超覆表明三叠纪时该区起伏逐渐降低了。在霍恩地堑中部，以其南北两端的 3 口井的层序推测，这里的沉积条件类似于中央地堑，特别是邦特的层序在北部的井中要粗些（Olsen，1983）。沉积作用以及相关的断裂作用引起下伏蔡希斯坦蒸发岩在边界断层和地堑中心发生盐岩运动。盐构造的生长持续了相当长过程，而在晚三叠纪时底辟发育达到了顶峰，此二地堑沉积史上的变化反映了它们构造演化的根本差异。在霍恩地堑、裂谷和沉陷的主要时期出现于早三叠世，地堑中心堆积达 4200m。与此

对应，中央地堑在整个三叠纪都是比较宁静的。

2. 斯卡古瑞克(Skagerrak)组

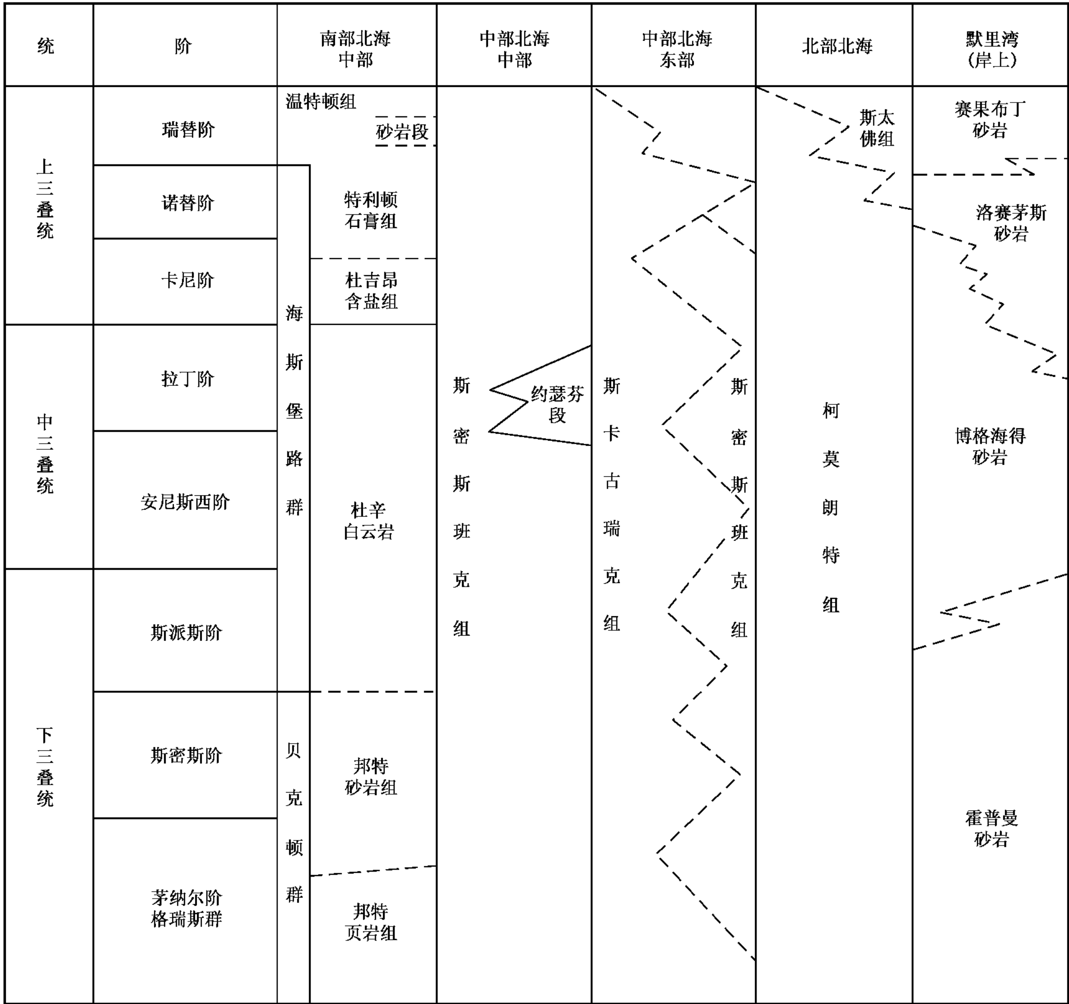
区域性迹象表明(见表3—5)，斯密斯卡古瑞克组代表斯密斯班克组的侧向相变，由交互成层的砾岩、砂岩、粉砂岩和页岩组成。Jakobsson 等(1980)把埃格桑次盆地(Egersund Sud—basin)的沉积层序解释成6个由构造诱发的向上变粗的旋回(图3—48)。旋回层序是从区域性的盆地下陷和一次海进开始的，蔡希斯坦期堆积的冲积物在中央湖泊或边缘海环境作为均一的砖红色页岩而被再沉积的。新生断块的连续下陷和侵蚀作用促使冲积扇迅速延伸，并伴有分选很差的砾岩沉积。第二旋回是从莫合卡克北丹麦盆地向北扩张而开始海侵的，边缘冲积扇的缓慢延伸仅反映在从互层的蒸发岩、萨布哈和河流沉积过渡为砂砾岩，第三旋回以风成沙和萨布哈沉积占优势，它们与一个新冲积扇的形成相联系，冲积扇以粗粒的质流(mass-flow)砾岩为其代表。第四、第五旋回各代表辫状河沉积，而以递进的冲积扇沉积而告终。第六旋回有可能被定为格萨姆(Gasswm)组，反映了瑞替期的海侵，此次海侵经由北丹麦盆地进入到中央北海盆地，并导致在埃格桑次盆地广泛沉积了河流相砂岩和粉砂岩。

表3—5　北海盆地三叠系对比表

对于默里湾盆地的沉积物由于岩性地层对比的困难，不得不另采用一套命名(见表3—5)。博格海德(Burghead)层河流相砂岩分隔了风成的霍普曼(Hopeman)砂岩与罗赛茅斯(Lossiemouth)砂岩，这一岸边层序可延伸到盆地中。不过，博格海德层向东变得更加富于泥岩。在岸上，这一层序是以赛果布丁(Sago Puddimg)砂岩而结束，而在盆地中则以钙质砂岩、砂质灰岩和泥岩所组成的层序为代表，它们可能属湖相沉积。

北部北海盆地的构造主要以南北向断裂为主，形成了若干个深而明显的地堑(参见图3—47)。Ziegler(1975，1978)认为，维京地堑的断裂作用开始于二叠纪，而西部的断层在整个三叠纪都在活动。维京地堑三叠纪沉积的厚度变化表明，差异沉陷以及相的关系都是与断裂控制下的沉积作用相适应的。但目前尚无公开资料说明巨厚三叠纪的完整层序已被钻穿，因而三叠系与下伏沉积物之间的关系以及哈迪森运动对盆地形成的作用，都还是不清楚的。Ormaasen 等(1980)指出：在伯瑞海湾(Beryl Embayment)，具有页岩夹层的陆相砂质红层其沉积作用以晚二叠世延续到早三叠世。然而在维京地堑周围的盆地中，如北东的东设得兰盆地、以东的斯托德(Stord)或霍达(Horda)盆地(见图3—47)在以断层为界的边缘地带应以冲积扇沉积为主，而在“凹陷”地带将为细粒的河流或湖相沉积物。在完整的三叠系剖面被钻穿以前 Deegan 和 Scull(1977)已在北部北海盆地中确定了一个三叠系的层组——柯莫朗特(Cormorant)组(表3—5)。

典型的柯莫朗特组是由粉红或白色细或中粒的泥质砂岩夹若干红色—褐色粉砂岩和页岩所组成。朝向东设得兰边界断层，发育有较厚的粗砂、砾岩层，其上才是典型的柯莫朗特组岩相，由于局部构造活动的控制，每个断块之间的厚度变化非常之大，可达2000m之多，无论是岩性地层对比或是生物地层对比，对于这些受构造控制的沉积物都是很困难的。孢子花粉证明，接近本组顶部的一个相当广布的含泥质层位是诺利克期到早瑞替期的，而更高些的层位是属于瑞替期的。由于控制维京地堑沉积作用的构造背景比较复杂，所以对柯莫朗特组各种相的沉积环境进行概括是难于完成的。鉴于其缺失海相生物，故应为湖相环境。加之砂岩通常分选很差，具泥基质，经常与所夹页岩呈现为过渡边界。分选差以及在页岩和泥基质中见有氧化的植物碎片，都是与低能环境的沉积作用相吻合的。Clemmensen 等(1980)认为，边缘冲积扇通过辫状河流和稳定支流河道将物质输送到一个位于中央的、向北排水的狭长盆地或者是



系列含煤盆地。这样就应包含有湖相和萨布哈相环境。在三叠纪末期,来自北方的波瑞海的海侵导致维京地堑最北端的盆地中心部分出现了海相环境,而沿着边缘,则出现了河流三角洲环境(Clemmensen 等,1980;Jakobsson 等,1980)。所以在维京地堑北部从柯莫朗特组到上覆斯坦特福约德(Stotfjord)组是整合过渡。

斯塔福约德组本来是 Bowen(1970)定名的,从柯莫朗特组到斯塔福约德组的过渡在典型剖面中是一套由混杂的灰岩、绿色和红色页岩夹薄粉砂岩、砂岩和白云岩组成的向上变粗的层序。这一套厚 60m 的单元构成了栾德(Rande)段(见表 3—5)。该段的时代一般认为是瑞替期的,最大可能是晚瑞替期的,不过,由于可资滥定的孢粉植物群贫乏以及单靠孢粉标志来确定三叠—侏罗纪的界限,不可能准确地定出本段的上界。

3. 小结

总之,整个三叠纪的沉积主要都是堆积于陆相盆地的碎屑质红层。在中北海—林克宾芬隆起以南,沉积层序展现了相当稳定的侧向一致性,并含厚的盐岩。在该隆起以北,以断层为边界的各个沉积盆地则缺乏稳定的盐岩,并且也没有什么岩性地层上的一致性。到三叠纪末,准平原化已经形成。早侏罗世海进迅速侵袭了广袤的大陆泛滥平原和北海各盆地的潮坪,从

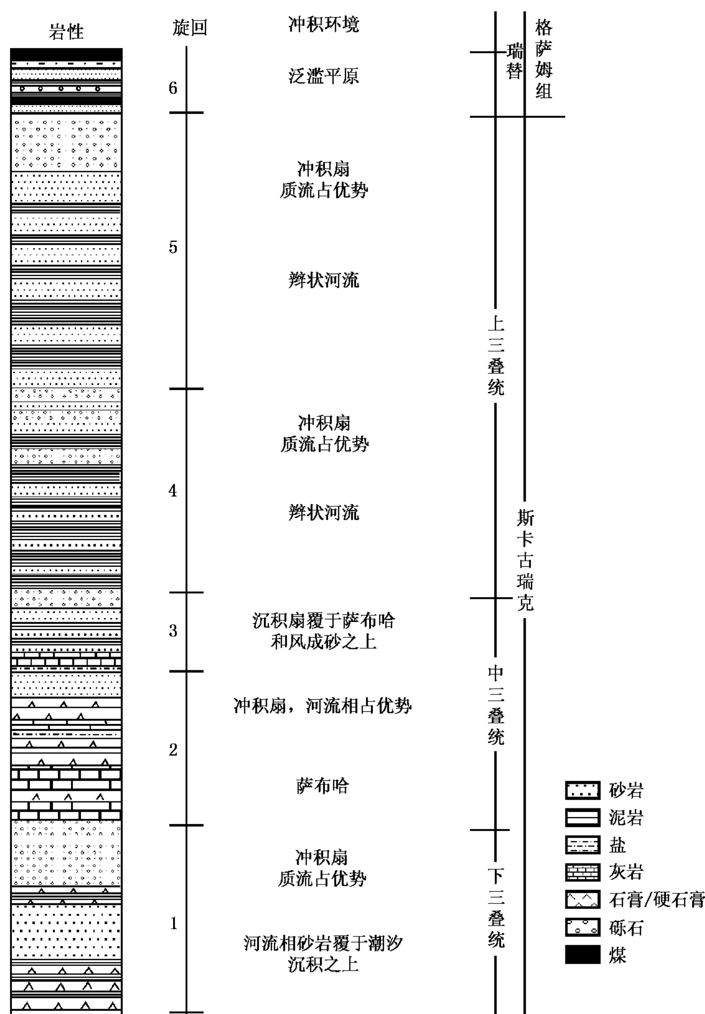


图 3—48　ES—B 地区斯卡古瑞克组的典型岩性剖面

（据 Jakobsson 等，1980）

而在北海盆地重新建立了陆缘海相条件。

四、侏罗纪地层

从经济观点上来看，侏罗系是北海盆地最重要的地层单元系统。在北海的中部和北部，晚侏罗世启莫里阶粘土岩组（Kimmeridge Clay Formation）中富含有机质的海相页岩是区域性的主要生油岩。而且，早已证明在维京地堑、中央地堑和默里湾盆地等（图 3—49）北部北海主要地堑系统中，对侏罗系地层的研究和勘探一直都是非常重视的。

由于显而易见的原因，在北部北海侏罗系年代地层单位采用的术语很不一致，造成了复杂混乱的情况，因而为北部北海盆地内的侏罗系地层的有效对比带来了一些困难。侏罗纪地层绝大部分发育于断陷盆地中，这些断陷盆地和二叠纪开始活动的复杂地堑系统的演化有关。侏罗纪是断层的活动时期。断裂控制着差异沉降与沉积作用，对地层的厚度和岩相有明显影响，在晚侏罗世尤其明显。侏罗纪活动的断层，在北海的不同区域有证据表明与前寒武纪、加里东期和华力西期的线性构造重新发生活动紧密相关。多数错位沿着正断层发生，其中许多

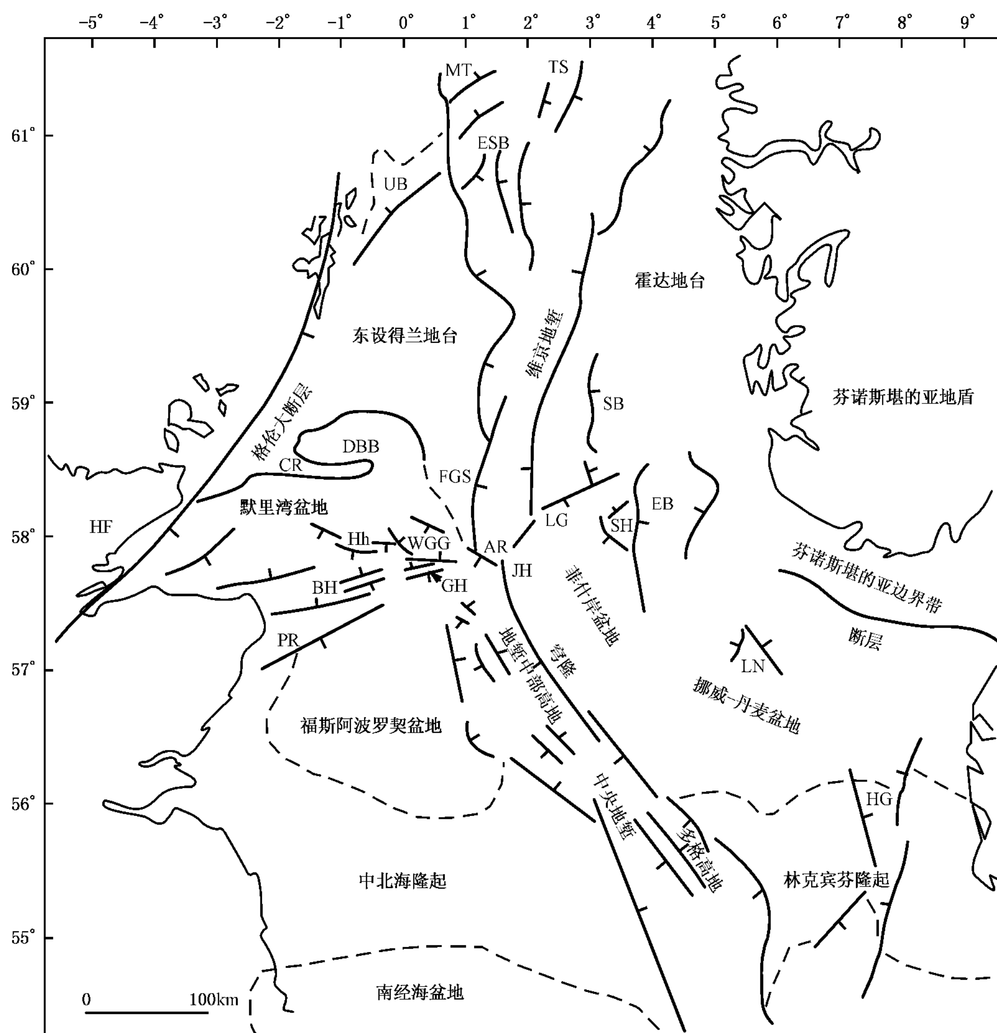


图 3－49　北北海盆地侏罗纪时期主要地堑系及构造单元简图

AR—Andrew 海岭；BH—Buchan 地垒；CR—Caithewss 海岭；DBB—Dutch Bank 盆地；EB—Egersund 盆地；ESB—东设德兰盆地；FGS—Fladen 海底山嘴；GH—格林地垒；HF—Helmsdale 断层；HG— 霍恩地堑；H—Halibut 地垒；JH—Haeren 高地；LG—灵地堑；LN—Lista 断鼻；MT—马格纽斯断槽；PR—Peterhand 海岭

断层具铲状几何特征。对于默里湾盆地，中央地堑和维京地堑交叉处的中侏罗世火山锥之形成是地幔柱上隆作用所致，这些盆地可以认为是夭折三连点的臂。但也有的认为在这些主要地堑之下的许多区域存在异常的大陆地壳（Christie 和 Sclater，1980；Donato 和 Tully，1981），他们根据区域岩石圈拉张的假说，认为扩张的高峰期存在于中侏罗世（Wood 和 Barton，1983）。这个模式设想整个侏罗纪直到中白垩世处在拉伸和断层控制的下沉状态。地层资料表明北海中部在中侏罗纪处于广泛的区域性上升状态。侏罗纪以后运动对现在格局的影响是非常明显的，晚白垩世盆地的转换导致了强烈的上升和侏罗纪地层被剥蚀（见图 3－50）。除了构造作用（地裂作用）外，影响侏罗纪沉积作用和地层的另一个重要因素是海平面的变动。侏罗纪的特点是海平面直至启莫里阶期都是全面的上升。Rawson 和 Kiley（1982）证明了在接近伏尔加早期，北海盆地经历了一个从海进到海退的变化过程。说明了盆地下沉速度和海平面变化速度间的相互影响是非常密切而明显的。

图3—50　北北海盆地侏罗系地层岩性对比概要

下侏罗统，主要由广泛海进沉积的泥岩组成，在北部北海盆地侏罗系3个统中分布范围最小，它的分布与中部北海区域隆起和在中侏罗世时被广泛剥蚀有关。下侏罗统与下伏三叠系呈整合接触和上覆中侏罗统地层，一般是不整合接触，但在不同地区不整合的强度是有所不同的。

由陆相到滨海的中侏罗统，是砂质岩为主的地层——重要的油气储集层。中侏罗统在维京地堑的北部厚度约为300m，在默里湾盆地西部厚150m，在中央地堑、维京地堑和默里湾盆地的交叉处，中侏罗世的玄武质熔岩堆积超过了750m。

上侏罗统是海相地层（图3—50），由黑色泥岩和富含有机质的页岩组成。但大部分地区还是存在着重要的砂岩储层，上侏罗统地层沉积稳定，岩相侧向追溯变化不大，纵向没有明显的地层间断。

侏罗系地层的分布，很大程度上和三叠系相同，以中部北海林克滨芬隆起为界，向北扩展，存在着重要的侏罗纪盆地延伸部分，在霍恩地堑中只能见到上侏罗统的薄层分散分布的泥岩（Best 等，1983；Olsen，1983）。对整个区域来说，由于上升的幅度和时间的不同。特别是盐类构造作用的影响（即从三叠系盐类向上的流动），以及侏罗纪后的广泛剥蚀作用尤为显著，使侏罗系地层呈孤立发布，已有勘探实践也证明，在相当的盆地区域中仅保存有残余的侏罗系地层。

1. 中央地堑区的侏罗系地层（图3—50）

中央地堑是由旋转的和雁行排列的正断层限制的宽阔槽地，南北走向、向北走向转变为北西—南东向，北延至维京地堑和默里湾盆地交叉处，堆积了一套厚厚的中侏罗世火山岩，在该地堑东侧被Vestland隆起限制，由不对称的复合断块组成，这些断层向东倾入到挪威—丹麦盆地。在地堑的西翼，有一和晚古生代的福思盆地一致的宽陆架。在这些边缘地区里，侏罗系地层很薄，甚至缺失。另外该地堑广泛存在盐类矿物的流动，通过盐类矿物的流动和差异上升影响本区侏罗纪的下沉。晚侏罗世的沉积主要是受断层控制的下沉作用，而且下沉速率还是比较大的。

根据目前的资料，下—中侏罗统在该区的分布不广，据报道在中央地堑有巴柔—巴通阶地层的存在。由于受断层控制的下沉较为显著，因而局部接受了中侏罗世的沉积。在卡洛夫期恢复了广海环境，在丹麦和挪威地区沉积了海相页岩。而在英国地区最早的海相页岩沉积可能在牛津期。但含有陆相的含煤地层仍然是卡洛夫阶的特征，在一些地区可以用它来确定地层的年代。

海相环境从牛津期一直延续到侏罗纪结束，上侏罗统主要是泥岩沉积序列，其中为富含有机质的启莫里阶页岩。在泥岩沉积的同时、砂岩也沉积在中央地堑的边缘和一些盆地内的凸起上。上侏罗统围绕中央地堑“凸起”区呈薄的不连续分布。在其西部陆棚上，底部海侵砂通常被启莫里阶页岩层所覆盖；在中央地堑东侧和挪威—丹麦盆地间，由于Vestland穹隆的存在，晚侏罗世的大部分时间它起了局部屏障作用。尽管当时已形成区域性的海退，但在这些“凸起”上还是沉积了一套薄层海相页岩，说明在此期间下沉的速度超过了海平面的下降速度。

2. 挪威—丹麦盆地的侏罗系地层（图3—50）

挪威—丹麦盆地位于中央地堑和维京地堑以东，Vestland穹隆的几个断块将该盆地与上述地堑隔开。盆地南侧以林克宾芬隆起为界，东侧及北东侧以芬诺斯堪的那地盾为界，北侧则以霍达地台为界。该盆地分成西北和南东两部分，分别是挪威次盆地和丹麦次盆地，二者以利斯塔鼻（Lista Nose）为界。

挪威—丹麦盆地最厚的和最完整的侏罗系层序见于丹麦次盆地，其中一些地区发育了约1200m厚的侏罗系地层。下侏罗统地层很可能有过广泛的分布，而现在仅作为西部的侵蚀残留物发现在挪威区段。在挪威地区，中侏罗统与下侏罗统或更老的地层间主要呈不整合接触。挪威区内的下侏罗统地层仅保存在下降断块的低处。Otsen和Strass(1983)曾报导Egersund次盆地中，下—中侏罗统的火山物质以及海相页岩，局部厚达800m。另外Otsen和Strass(1982)、Hamar等(1983)记录了一个从巴柔阶—巴通阶的三角洲序列，向上过渡为卡洛夫阶浅海砂岩，不整合覆盖于较老地层之上。海相沉积的粉砂岩和页岩层序，由卡洛夫期一直持续到牛津期。横向上可与丹麦区内的Haldager组地层相对比。

上侏罗统在整个丹麦次盆地中以海相沉积占优势。是一套页岩层序(Bϕrylum段)，其上覆以近岸的粉砂岩和砂岩(Frederikshavn段)。较粗的沉积物来自芬诺斯堪的那边缘带，横向上向西南逐渐过渡到同时代的页岩(Koch，1983)。挪威次盆地的上侏罗统占优势的仍是海相的页岩，有时是放射性页岩，在挪威地区最为发育。在晚侏罗世时挪威—丹麦盆地的大多数构造“高地”都位于水面以下。而且与中央地堑及维京地堑的海水是连通的。

3. 默里湾盆地的侏罗系地层(图3—50)

默里湾盆地从东部的维京地堑和中央地堑的交叉点向西延伸到苏格兰海岸，此处侏罗系出露于岸上。该盆地的北部边界部分由凯恩内斯山脊组成，这是一个断层所限的东西向“高地”。再向东，在东设得兰地台内一个被称为荷兰海滩盆地的大海湾向北扩展了盆地的范围(参见图3—49)，山脊和地台由泥盆纪地层组成。盆地的南部边界由彼得黑德山脉组成，这是一个NE—SW的基岩“高地”。该盆地内，下—中侏罗统被大量小正断层所破坏，这些正断层大多消失于上侏罗统地层中。

岸上的露头为盆地内侏罗系地下发育情况提供了一个有用的窗口。下—中侏罗统可解释成海进—海退—海进层序。浅海沉积作用一直持续到牛津期，但是邻近的NE—SW向Helmsdale断裂的重新活动导致了晚侏罗世时期海洋重力流砂岩和“漂砾层”的沉积。下侏罗统Dunrobin Bay组(赫特——普林斯巴哥阶)由含薄层砂岩的页岩组成，土阿辛阶—巴柔阶在沿岸露头中没有代表地层，出露的地层是巴通阶的Brora含煤层组。该组为一套砂、页岩互层层序，其顶部为稳定的煤层，代表了河口湾或海岸平原环境，偶尔也有海侵环境出现。卡洛夫Brora泥岩组覆盖在侵蚀面之上，它由含化石的海绿石页岩和夹少许砂岩组成，反映了重新回到海洋环境。类似的环境一直持续到牛津期，在此期间沉积了Brora砂岩组，属一个浅海砂坝沉积。局部地区，在此层序之上是Ardassie石灰岩组(牛津阶的一部分)，严格说来，是富含Rhaxelle海绵骨针的钙质砂岩。沿岸出露的最年轻的侏罗系是Helmsdale漂砾层。漂砾层由粗角砾岩、砾岩和砂岩组成，是多种重力流形成的沉积，并与黑色海相页岩互层。

在默里湾盆地中发育了更为完整的侏罗系层序，据Beatnie油田(英国11/30区块)描述的层序与沿岸的下—中侏罗统极为一致，下侏罗统海进层覆于一套特征明显的三叠纪薄燧石质石灰岩之上。这个广布的地层单元属于风化壳带，是造成盆地内大部分地区侏罗系底部强地震反射的原因。土阿辛阶—巴柔阶是在广泛三角洲沉积背景上形成的一套向上变粗的砂质层序，最上部由煤层覆盖着。这些冲积平原沉积物又被海相卡洛夫阶浅海砂岩覆盖，横向上有些地区卡洛夫阶最上部很快相变为页岩，再往上侏罗系地层主要是页岩。下—中侏罗统层序约300m厚，但有些地区可能更厚。一般来说，在该盆地内侏罗系横向上显示厚度变化不均匀的特征，岩性变化亦大。在默里湾盆地东部中侏罗统地层，由玄武熔岩和凝灰岩组成。这些火山岩的时代已被确定为巴柔阶—巴通阶。向北和向西变为由火山碎屑沉积物、凝灰岩、煤夹层

和熔岩流互层形成的层序。火山活动到卡洛夫期即已停止,因卡洛夫阶主要由薄层的、补丁状的砂岩、页岩和煤组成。上侏罗统地层主要由页岩组成,仅含很少砂岩层;砂岩层可能为远端的海底扇沉积。沿岸区发现的粗碎屑相在此缺失。根据地震剖面上反射终止现象,在默里湾盆地内的上侏罗统中,识别出由大至小的不连续地层界面,通过某些地震不连续面在区域范围上的制图,知道了晚侏罗世沉积是"楔形"充填,沿 NE—SW 向的主断层方向变厚。因而揭示出沉积相在横向上的剧烈变化原因,主要与来自断崖的粗碎屑向海洋盆地供给有关。与盆地内主断裂有关的相似过程可能在其他地方也会产生另外的上侏罗世杂岩楔状体。在默里湾东部,上侏罗统主要由两个分布广泛的海相地层单元组成,即 Pipes 组浅海砂岩和上覆富含有机质的启莫里阶泥岩、页岩组构成。在某些盆内"高地",由重力流沉积的砂岩部分地取代了这些页岩。

4. 维京地堑的侏罗系地层(图 3—50)

维京地堑为一个南北向的线性槽地,跨立于北部北海挪威与英国疆界。东设德兰地台位于地堑以西,大部分面积为第三系地层直接覆于泥盆纪红层之上。向东是威斯特兰(Vestland)穹隆,这一狭长的大断层为边界的山脊,具有薄的侏罗纪地层。威斯特兰穹隆把维京地堑与 Stord 盆地分隔开(图 3—49)。

该区下侏罗统地层主要是一套海相页岩,底部是一层重要的砂岩,分布在维京地堑的广大地区,但在其南部由于大多数钻井的目的层为上侏罗统,故对其分布情况尚不甚了解。在东设德兰盆地的一些地区发现了下—中侏罗统之间有小的间断面,在该盆地中最早的侏罗纪沉积物是一套斯塔福约德组砂岩。在挪威—丹麦盆地也有类似的沉积地层,叫 Gassum 组。在标准剖面上,发现斯塔福约德组地层,由下而上,为泛滥平原、曲流河、网状河和顶部的海岸平原沉积,其沉积环境由非海相转到海相。该组地层在维京地堑北部中心最发育,向西超覆于东设德兰台地的边缘上。该组的不同层位不整合地覆于三叠系之上。其底部砂岩向南延伸,构成了贝利尔(Beryl)油田的重要储层。在斯塔福约德组之上,仍以海相页岩为主,夹有许多薄层状砂岩,这些薄砂岩层也构成了一些油田的部分储层。

中侏罗统(也称布伦特(Brent)群)地层是以砂岩为主的三角洲层序,被上侏罗统海相页岩覆盖着。两者接触界面局部为不整合,尤其是东设德兰盆地中掀斜断块的顶部,布伦特群可能大部分被剥蚀掉了。维京地堑最南部,中侏罗世地层中含有火山碎屑物质,这些火山碎屑物质可能来源于维京、中央等地堑交叉处的火山中心。已有报导布伦特群中存在火山灰层,这是中侏罗世有火山活动的充分证据。布伦特群是目前北部北海产量最高的储集层,研究得比较详细。目前把该群地层划分为 5 个次级地层单元,即 Broom 组、Rannoch 组、Etive 组、Ness 组和 Tarbert 组,图 3—51 大致描述了各组的侧向变化。底部 Broom 组是一层薄的分选差的长石砂岩及泥质砂岩,一般认为是浅海的席状砂岩,上覆的 Rannoch 组的砂岩富含云母,认为是浅海相、三角洲前缘或临滨(Shoreface)沉积,其中的白云母富集于层理表面,因而起到了阻止流体通过储层垂直流动的作用。Budding 和 Inglin(见图 3—52)等认为紧接的 Etive 组分选较好的块状砂岩,是次一级环境—障壁砂坝的复合体。该组砂岩渗透率很高,Rannoch 组与 Etive 组一起构成广阔的、易于对比的席状砂体。Ness 组是障壁滩后的泻湖、冲积平原沉积。岩性变化很大,由砂岩、页岩及煤互层构成。砂体通常不连续,但在河道砂堆积的地区,Ness 组中部页岩,属于开阔泻湖相沉积,具有标准层的作用。最上部是 Tarbert 组,主要是砂岩,局部富含云母,夹有少量页岩夹层。它是最先反映海进的信号,海进最终淹没了布伦特三角洲。该组厚度小,在断块高处钻井剖面中完全缺失。

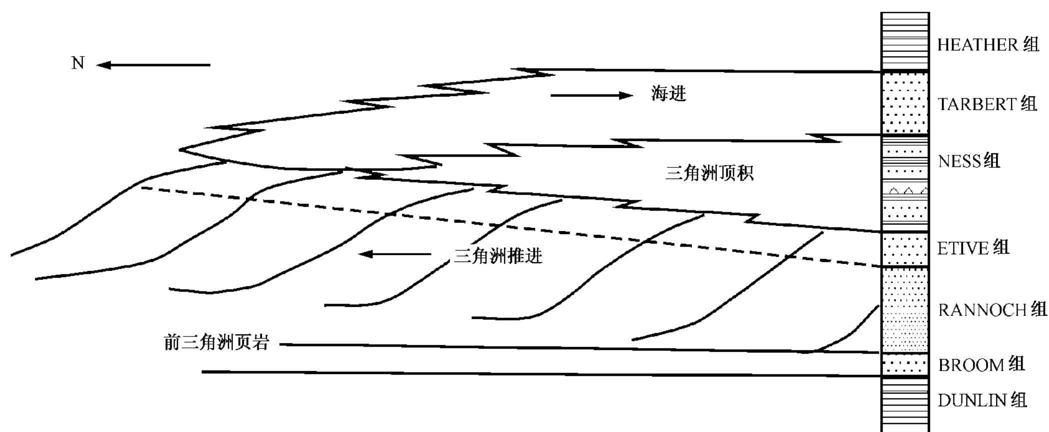


图 3－51　北北海盆地中侏罗统(布伦特群)区域相变剖面示意图

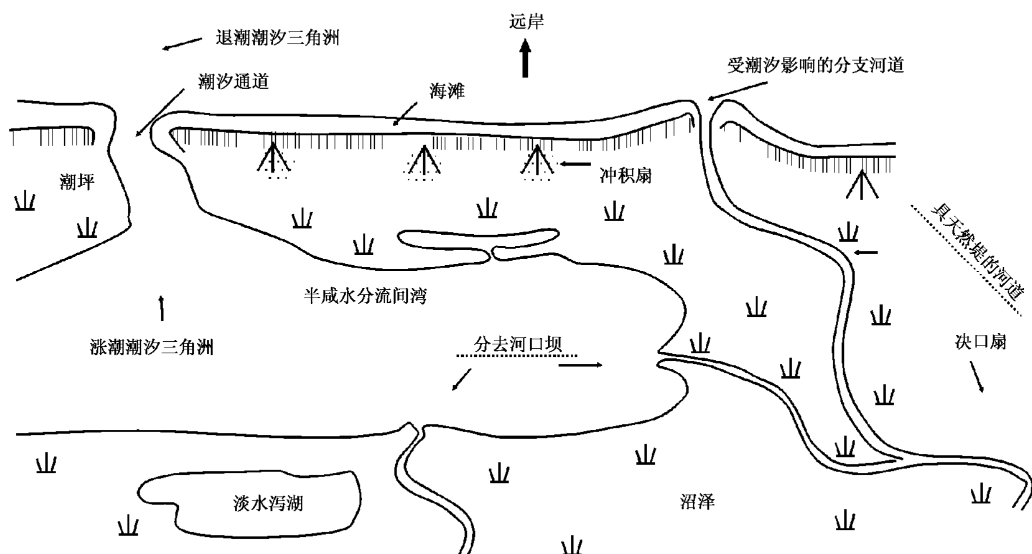


图 3－52　北北海盆地中侏罗统(布伦特群)区域相变剖面示意图

对于布伦特群的沉积模式及古地理,有人认为属三角洲沉积,在维京地堑的最北端变为海相页岩,在东设德兰盆地内发现 3 个前积三角洲叶状体。在地堑东侧也识别出一系列展布清晰的叶状体,这些叶状体发育在入海扇三角洲体系中。此三角洲横向上向北过渡为广海环境。对于布伦特群来说,由于同生断层的存在,使地层厚度在区域内存在变化;该群砂岩成岩作用产生的次生孔隙对影响油藏特点的作用很小,次生孔隙主要是由于碎屑长石及重矿物颗粒的溶解所造成的。成岩作用对砂岩储层的消极影响发生在 3 个连续的阶段内:石英的共轴生长、高岭石的生长以及最后阶段的纤维状伊利石的生长,最后阶段是对储层渗透性危害最大的阶段。但是由于伊利石的形成与碳氢化合物进入储层的时间几乎是同时的,因而,造成的危害并不显著。研究伊利石生长及其形成时间就成为一个非常重要因素。在维京地堑的东部工区也发现了中侏罗世三角洲沉积。Marcum 等(1978)在贝利尔油田南端的非海相到海陆相砂岩为主的地层中,划分出两个地层单元,分列叫做中贝利尔砂岩和上贝利尔砂岩,中贝利尔砂岩在年代上与布伦特群的大部分相当,而上贝利尔砂岩的年代为巴通期,与更北端的海相页岩相当。在维京地堑南部也找到了类似这样的沉积物(如在 Sleipner 油田发现了年代为阿林—巴

通期的 Hugin 组)，为岩性不一含煤层序，其上沉积了卡洛期三角洲前缘到滨海砂岩，该砂岩在纵横向上亦逐步过渡为 Heather 组的海相页岩的沉积。

上侏罗统地层主要是含海相页岩，仅局部发育了粗碎屑岩层序，尤其是沿地堑西缘，发育了由断层控制的冲积扇沉积。泥质岩层序包括富含有机质的、高放射性的启莫里阶页岩组，该层序覆盖在 Heather 组的页岩之上。在测井曲线上，两者界线清晰，明显标志是 r 射线响应向上增加。地震波速和密度向上减小。在该分界面上可能存在一个小的地层间断。启莫里阶砂岩被解释为海底沉积，形成了马格努斯(Magnus)油田的储层。粗的、近源的海底扇沉积物沿维京地堑南部西缘断层分布，并在那里构成了 Toni、Thelma、Tiftany 构造中的储层。在维京地堑的南部，Brae 油田的储层为砂岩和砾岩，被启莫里粘土层所覆盖。进入地堑轴部变成启莫里阶粘土岩、页岩层。Brae 构造上侏罗统的储层属何种沉积呢？一种认为是扇三角洲，另一种认为属海底扇。这两种模式的不同点是扇三角洲有突然的相变化，而海底扇沉积的重力流过程能够搬运碎屑 ，在末端的页岩中形成叶状体，因此，不产生突然的相变，同时也缺乏很好的储层。

在侏罗系中存在两套储集体系，即下侏罗统的 Statfjord 组及 Cook 组砂岩，中侏罗统布伦特群及其侧向上相当的砂岩层组，上侏罗统中的 Magnus 组、Bruce 组、Brae 组，还有 Troll 油田的砂岩。中侏罗统砂岩的分布是最广的。上侏罗统砂岩分布局限。启莫里阶粘土岩组是公认的主要生油岩，在大部分地区其埋深在 3000m 以下。在盆地大部分地区都是成熟的，只是成熟时间有些差异而已。

关于启莫里阶粘土岩组地层的沉积环境，一般认为是低能海洋环境沉积的一套黑色页岩、粉砂质页岩、褐色油页岩及薄层状石灰岩组成的岩层，页岩富含有机质，平均总有机质含量在5%～10%之间，陆源有机质含量比例向地堑中心方向大量减少。这种分布也影响了有机质成熟后生成的碳氢化合物的性质。页岩中的高放射性主要由铀含量引起，铀是被停滞在海底的有机质吸附而形成的。启莫里阶粘土岩组的沉积环境，归纳起来为两个不同的观点。一种认为藻席的大量繁殖使海水暂时缺氧，造成大量的底栖动物群死亡，形成了缺氧的海底环境，使得藻和其他有机质保存下来，使沉积物富含有机质；另一种观点认为侏罗纪后期海平面上升相当高，这样盆地内的水加深以及含氧气的表层水与底部的底层水的进一步分离，有利于形成缺氧底层。而且，这种缺氧环境还由于它与相邻海洋的循环被限制而加强。

5. 侏罗系与白垩系界线的讨论

侏罗系与白垩系之间的不整合在盆地的边缘及盆地内部“隆起”处都存在，但在北海的大部地区，两者多呈整合接触，通常该界面就位于启莫里阶粘土岩组的含有机质丰富的页岩和它的相当层段之上。在北海的主要地堑内，启莫里阶粘土岩组与上覆的 Cromer Knoll 群(下白垩统)的界面是相当清楚的，以相变为特征，即由富有机质页岩向上变成钙质泥岩、石灰岩或局部的砂岩。从测井曲线来看，该界面与地震波速、密度的向上增加相联系，并且导致侧向上连续的强地震反射。启莫里阶粘土岩组沉积的结束，可以用等时性环境变化来解释，厌氧盆地的突然消失与破坏是它的标志。这种变化与里亚赞期末的海侵是一致的。

五、白垩纪地层

在北海北部地区从早白垩世起由构造控制的沉积作用，转变成为以地堑系统为中心的区域性下沉为主的平静广海环境，后者为晚白垩世和第三纪的特征。白垩纪构造背景很大程度上是侏罗纪时构造背景的延续。老块体保持稳定，并被动地接受海侵。受断层控制的大、中型

盆地进一步沉降。在白垩纪最早期，即晚启莫里阶运动这种作用最为显著。

在白垩纪早期，欧洲西北部的海平面相当低，北海大部分地区为陆地。早白垩世海平面以上升为主要趋势（图 3—53），这期间的沉积受构造、气候和陆源的控制。到晚白垩世海平面仍一直上升，在坎佩尼晚期达最大程度，仅有苏格兰和挪威为陆地。北部北海及其他区域晚白垩世均为深海相的白垩沉积，可见当时海平面之高。只有维京地堑和设得兰台地的北部例外，发育了细碎屑物质沉积。

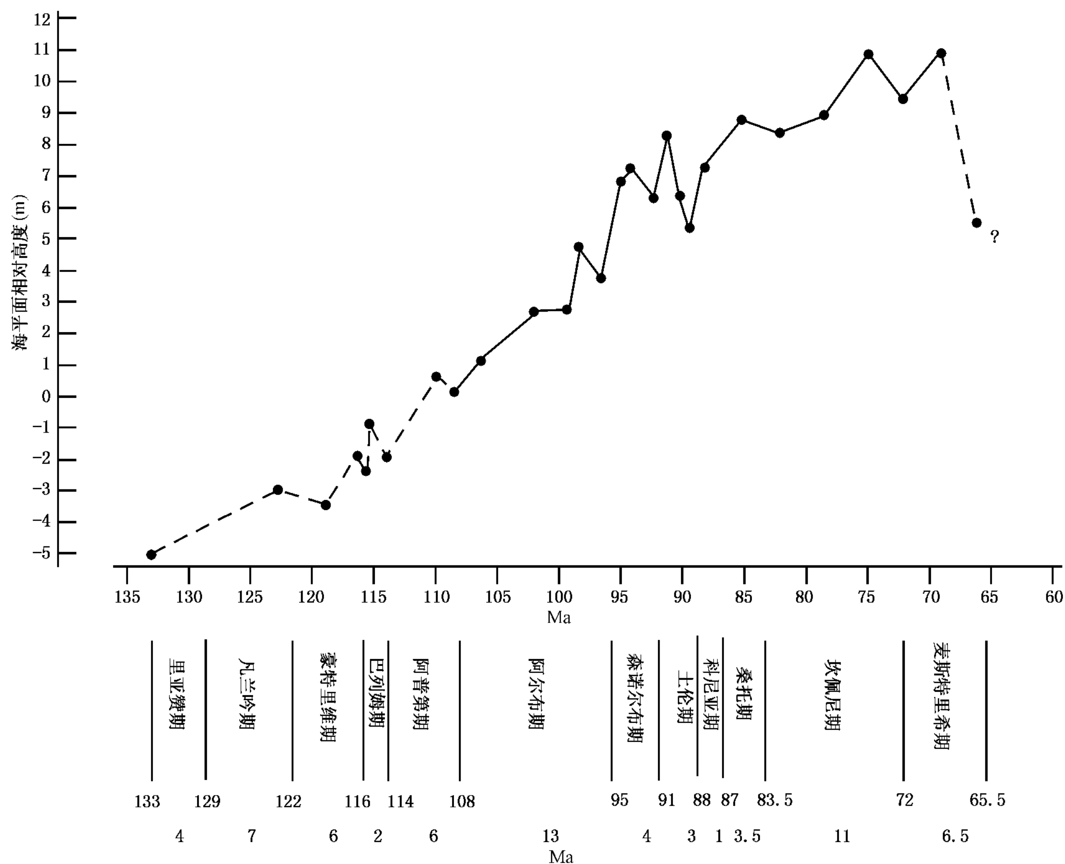


图 3—53　晚白垩世期间北北海及欧洲北部海平面变化（据 Kenffman，1979）

早白垩世时，许多陆地遭受侵蚀，到晚白垩世时，由于海平面升高，这种局势迅速的改变，在北部北海周围，惟有苏格兰、挪威和格林兰高地仍为未被淹没的陆地。下白垩统中沉积碎屑表明，气候具明显季节性。到晚白垩世时，许多迹象表明此时的气候已无季节性的变化，但气候变得更干燥了。

1. **下白垩统**

下白垩统的分布如图 3—54 所示，始终有一批大小不等的岛屿存在。该阶段早期，海水仅占据盆地的区域，向北通过维京地堑与古大西洋相通。因此动物具北方的特征，很难与特提斯区域相比较。阿普第海侵及阿尔比中晚期海侵区域范围广，现存该时期沉积物已出现在盆地之外，分布在北海高地等地区。

在默里湾盆地、南哈里布特（South Halibut）盆地威其格朗德地堑是一受断层控制的盆地与地垒的复合体（一般统称默里湾盆地）。了解程度较深的是默里湾盆地，其纵横约 150km，

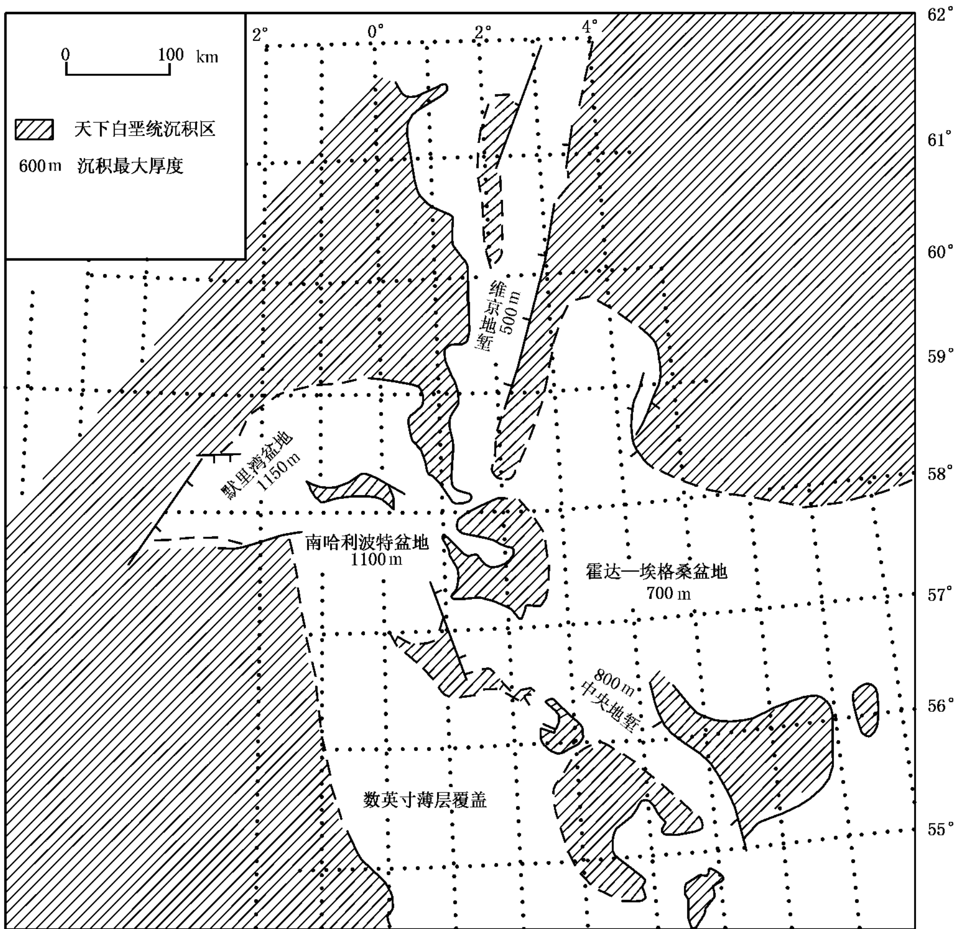


图 3—54　下白垩统的分布及当时主要盆地的沉积最大厚度

其滨岸地带下白垩统沉积厚度就厚达 650～700m。在断层陡壁下，以海底扇的形式沉积有砾石和浊积岩，在盆地中央，席状砂岩厚近于 1150m，可能为北部北海下白垩统地层厚度最大处。

在南哈利布特，晚启莫里阶运动期间，许多断层是活动的。在这个盆地内，在启莫里阶或伏尔加阶(Volgian)顶部存在明显间断；即使间断不明显，也有颜色或岩性变化。下白垩统为灰绿至红棕色含黄铁矿的砂岩。

在这些盆地较深处，均存在下白垩统各阶的完整层序。盆地中大多数砂岩中粘土含量多，故一般不是好的储集层，但是威其格朗德地堑东北翼南端，下白垩统的储层中含有凝析气。

维京地堑下白垩统组合受边界断层的控制，其与侏罗系地层是连续的沉积，堆积了几百米厚页岩，向北厚度增加。已报导的钻井中，几乎没有打算穿过这个层系的。而到设得兰台地边缘该砂岩沉积仅有 50m 厚。霍达—埃格桑(Horda—Egersund)盆地北端经威斯特兰(Vestland)高地与维京地堑相连，往东南和东面，进入丹麦—波兰凹地，其沉积中心与侏罗纪的盆地一致，大约在斯塔范格尔(Stavanger)东南 150km 处，其厚度一般为 500～700m。在盆地中央大部分地区与侏罗纪呈沉积连续，但少数地区，受盐丘底辟影响存在不整合接触。该套地层由灰色泥岩和页岩组成夹少许灰岩和白云岩，泥页岩中含黄铁矿和海绿石，薄层砂岩少见且分布无规律；只有在丹麦凹槽和斯堪的那维亚边缘附近，砂岩才成为下白垩统的主要成分。

中央地堑与埃格桑盆地相似，其下白垩统厚约500～700m，但荷兰部分地区有厚度超过800m的。该统大部分为灰色页岩，有些区域是以泥灰岩为主，部分层段也含少量砂岩。地堑北部及中部与侏罗系沉积是连续的，但在荷兰部分地区发现有明显间断，在上巴列姆阶还发现更大间断面，使得该区相当范围下白垩统全都遭受侵蚀（Heybock，1975）。

中生代时，中央地堑与东南的荷兰中部盆地相连通，但在早白垩世时期，二者为特塞耳—艾塞尔（Texel－Ijsselmeer）隆起所分隔。在隆起北端的维兰（Vlieland）盆地中白垩系底部的凡兰吟砂岩是一些油田的储气层。前凡兰吟阶形成的粗面岩和响岩，测定的Ar^{40}/Ar^{39}的时代是145～144Ma，应该是前白垩纪的（Dixon 等，1981）。在北海中部隆起的翼部二叠系地层响岩侵入体年龄约138±4Ma，是白垩纪的产物。

2. 上白垩统

除维京地堑的边缘断层以及中央地堑有轻微活动外，北部北海中大多数台地及隆起如中北海隆起、林克宾芬隆起、设德兰台地和维斯特兰隆起，在晚白垩世均为不活动块体。中北海隆起和林克宾芬隆起在阿尔比期处于水下，其下沉过程于坎佩尼期结束，当时海水也淹没了包括弗来登（Fladen）凸起和哈里布特地堑在内的设得兰台地（图3－55）。当时北部北海陆地仅有挪威和 Vtsira 高地（为原维斯特兰隆起上的一小块区域），此外还有苏格兰高地，包括当时较早期的东设德兰台地上的许多岛屿。该时期都属盆地相的沉积，完整厚度都有400～500m。而在盆地的许多海槽内，厚度可达千米以上，如维京地堑北端厚度＞1800m，中央地堑厚度大于1200m。默里湾盆地的上白垩统大部分在第三纪时被剥蚀掉了，所以其最大厚度很少超过500m。上白垩统的白垩主要由海底扇重力流沉积形成。

上白垩统地层的岩石组成，主要为白垩，连古新统下部也是白垩，在中央地堑尤其是这样（见图3－56）。在纬度57°以北，由于碎屑组分加入使得白垩比例下降。在维京地堑和纬度59.5°以北的设德兰台地上，几乎全为碎屑岩，但在地堑勘探范围的最北端的马斯特里赫特阶中，仍有几米厚的白垩（图3－57）。

在中央地堑碎屑成分主要分布在前三冬阶地层中，为泥岩与白垩混合层，偶尔含有微量砂，白垩中含分散白云岩晶体，在维京地堑南部，上白垩统地层中含白垩最少，其下部为厚度很薄的泥灰质白垩，向上发育着粘土岩（有时含黄铁矿），夹灰岩薄层的泥灰岩。最上部亦为厚度不大的泥灰质白垩。在维京地堑北端几乎整个层系均为碎屑岩，粘土内渐含粉砂质，在三冬阶—坎潘阶中有石英砂条带。设得兰组岩性为灰—黑色层纹状粉砂质页岩，与西部的堪萨斯的 Rierre 页岩相似（Hancook，1975），有可能是格陵兰东部 Kangerd Iugssuaq 组的延续。

整个北海的上白垩统均以白垩岩相为主，而且在丹（Dan）和埃科菲斯克油田是白垩作为储层，因此在油气勘探过程中一直很重视加强对其岩性的研究（表3－6）。

白垩是一种粒度非常细的灰岩（按福克划分为泥晶），其大部分是定鞭藻纲的浮游海藻骨骼（金棕藻）。海藻类型有钙质海绵纲胸甲球石和超微锥石。此外，还有一些其他生物，包括漂浮和底栖有孔虫类、双壳类（尤其是叠瓦蛤属）、棘皮动物类和苔藓动物类。并非所有定鞭藻纲都有硬骨骼，但有硬骨骼的这类生物能分泌0.5～1μm大小的小板片状方鲜石。这些板片成环状排列，称之为颗形石（Coccoliths）在活的海藻内约7～20个颗形石组成直径约10～13μm的颗石球（Coccosphere），球外包有一层软薄膜。完整的颗石球在白垩中少见，但完整的颗形石则十分常见，虽说比起单板来又要少得多，人们可将白垩定名为颗石藻灰岩，若不是因为金棕藻是桡足类的主要食物，这样小的颗粒要沉到海底将需几年。而这些小甲壳类生物，仅几毫米长，为海洋内最丰富的多细胞动物，其只需一天多就可沉到海底，而每个粪粒内均包含有成

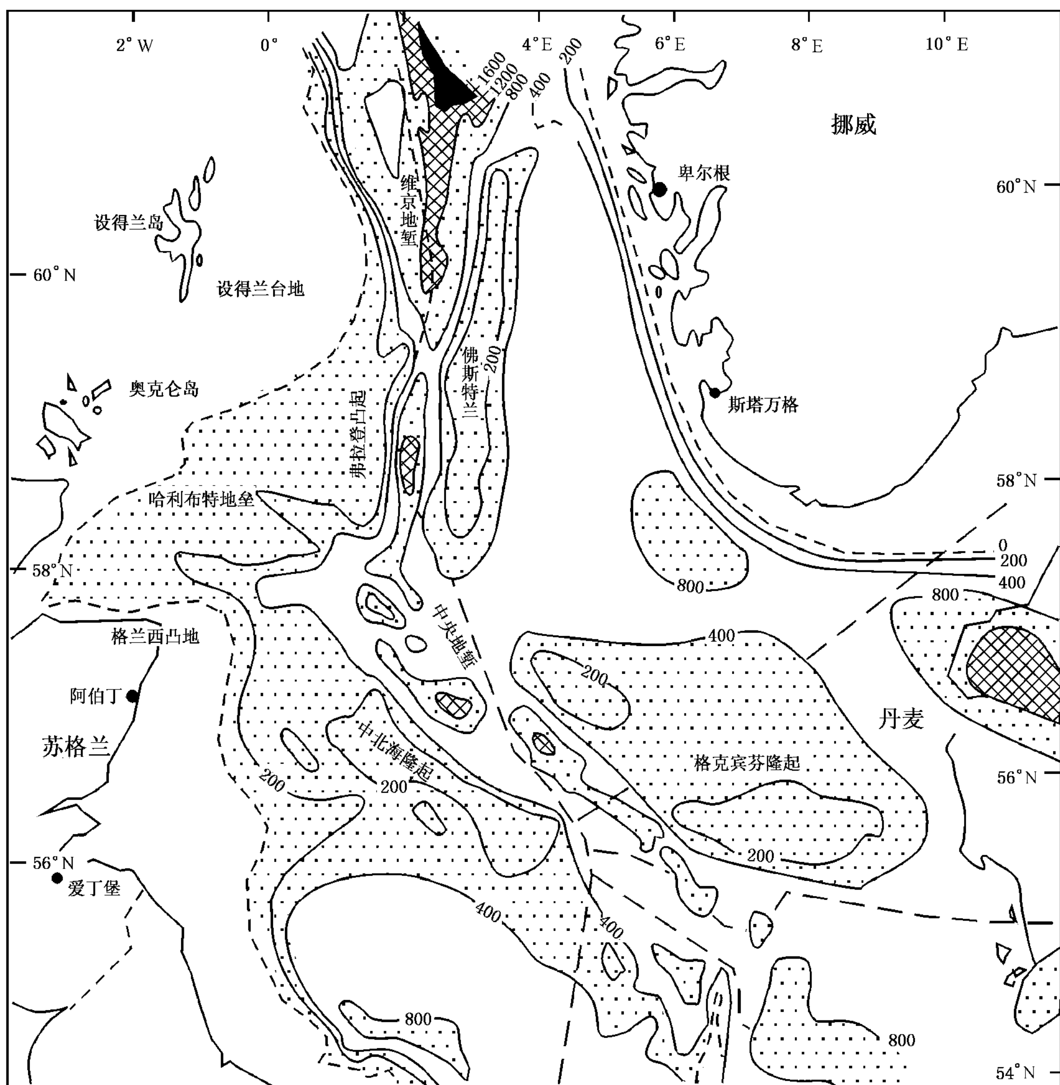


图 3—55　北北海盆地上白垩统—古新统等厚度图(据 Ziegler,1982)

千上万个颗形石。颗形石是以低镁方解石成分所组成的。因此它们在地表温度压力下保持稳定,而其他钙质沉积物则以高镁方解石和(或)文石为主,这两种矿物在地表温度、压力下都是不稳定的,因此,大多数碳酸盐沉积物一旦失去有机膜保护便开始了成岩作用。而白垩能基本保持稳定,故次生孔隙不发育。

在成岩作用前,颗形石板也并非完全杂乱分布的,而是部分呈不规则团块;一个团块至多可包含 50 个板,一般仅 3～4 个板,其结果产生相对较大的孔隙,直径 6μm 以上。如果没有团块存在,将不会有这么大的孔隙。白垩的孔隙可高达 70%,但其一半将由于失水(埋藏几十米至几百米内)失去(即孔隙度降至 35%～47%,Scholle,1977)。这些资料是用岸上白色白垩样品测试得出的典型数值。但是正常情况下,这些高孔隙度往往伴随着低渗透率,因为其粒间孔径微小,多数在 0.1～1μm 范围内,岸上白垩之所以往往整体渗透率很高,这是由于有裂隙解理或使孔隙增大的溶解作用存在。如果没有这些作用,白垩更适宜作盖层而不是作储层。白垩成岩作用影响较大的是晚期成岩作用,包括由上覆压力、高温流体及局部构造应力引起的作

用。上述因素之一均可导致:①小晶粒被溶解,并作为颗形石的加大部分而沉淀;②粒间胶结;③微亮晶充填。如果沉积深度很大,即使不受上述3个因素的影响,同样会发生类似变化,但在北海不存在这种情况。在北海,热流虽不容忽视,可埋藏成岩作用却是其最重要的影响因素,何况构造应力亦起一定作用。上覆载荷使孔隙度和基质渗透率相应减少;在1500～2000m,孔隙度一般为15%～30%,渗透率(0.1～1)×10^{-3} μm^2;在2700～3000m,孔隙度2%～25%,渗透率(0～0.5)×10^{-3} μm^2;当孔隙度减至20%,基质渗透率通常小于0.5×10^{-3} μm^2(Scholle,1977)。因此在丹油田,1765m新生代沉积之下,霍德油田2600m新生代沉积之下,埃科菲斯

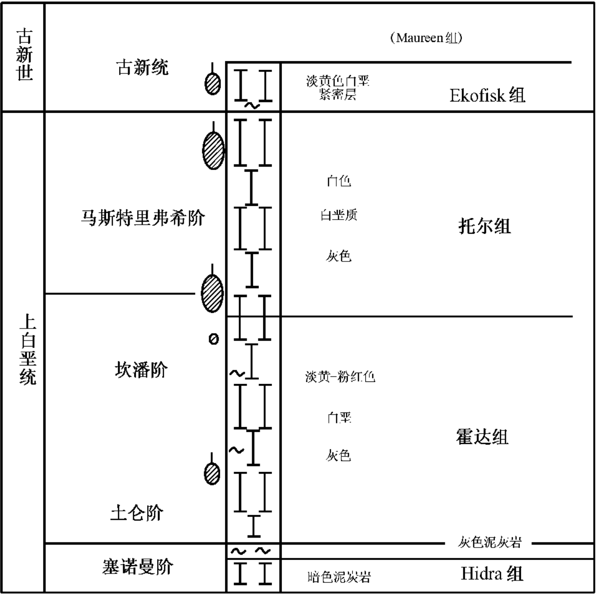


图3—56　中央地堑中、上白垩统地层的一般序列

图3—57　北部北海盆地上白垩统S—N向岩相剖面

构油田3200m覆盖之下仍发现生产性白垩储层,人们不免要感到惊异。这些生产层中实际孔隙率都相当高,在丹油田,大多数白垩具25%～30%孔隙度,其中有两层最大达30%～40%;在埃科菲克油田平均孔隙度为30%,最高可达到40%;在霍德油田孔隙度高于30%。扫描电子显

微镜研究结果表明，这些均为原生孔隙，由于油的早期进入，使得它们得以保存（晚古新世—早

表 3－6 北海地区白垩纪地层对比表

	英国东部陆上	Sole Pit盆地	中北海西部	维京地堑	挪威部分	丹麦部分	荷兰西部	英国南部
古新世			埃克菲斯克白垩层		埃科菲斯克白垩	白垩6		
马斯特里赫特期			托尔白垩		托尔白垩	白垩5 白垩4		
坎潘期						白垩3		
三冬期	Flamborough白垩	白垩	Flounder白垩	设得兰组	霍德白垩		白垩	上白垩层
康尼阿克期	Burnham白垩					白垩2		
土仑期	Welton白垩		Herring白垩					中白垩层
塞诺曼期	Plenus泥灰岩 下白垩层		Plenus泥灰岩 Hidra白垩		Plenus泥灰岩 Hidra白垩	白垩1	Texel泥灰岩	下白垩层
阿尔比期	红白垩层 硬铁质砂岩				R φdby组 Sola组	R φdby组	上荷兰泥灰岩 荷兰G'砂岩	U.G.S. Gault
阿普特期	Sutterby泥灰岩		瓦尔霍尔组				下荷兰泥灰岩	下绿砂岩
巴列姆期	Fulletby层							
戈特里夫期	Tealby层	Speeto粘土岩		Cromer Knoll组	瓦尔德尔组	瓦尔德尔组	维兰页岩	韦尔德粘土岩
凡兰吟期	Claxby Ironstone	Spilsby砂岩	Devil's Hole砂岩					黑斯迁斯组
里亚赞期	上Spilsby砂岩				曼达尔组		Delfland组	普尔欠克组

中新世)，而且油的饱和度也高，如在霍德油田，白垩中油的饱和度高达80%，油取代了孔隙中的水，使得成岩作用不易进行。在油饱和不久，可能由于上覆新生界页岩的压实及生物成因气的生成使水的流动受到阻滞，白垩处于超压状态。在埃科菲斯克地区，地下3000m处，正常静水压力应为4300Psi(1psi＝6.9kPa)，但在孔隙中，流体压力高达7100Psi。且这种情况仅限于中央地堑而不延至边界断层以外。由于油承受着上覆新生界重压的三分之二，白垩薄片观察表明尚未遭受紧密压实，从而保护了原生结构和孔隙。乍一看，在白垩这么细的物质内竟有如此高的油饱和度似乎含人感到吃惊，其实这可用多孔物质中毛细管压力作用加以解释。在3000m深处，温度达200℉(90℃)，油置换白垩基质中的水仅需不大的压力。在这种条件下，高温、高压和油气比值使油水表面张力降低的程度比白垩中极细孔隙分布的影响更为重要。白垩油田中气和油比值高(可达1000～2000ft/bbl)、粘度低(36API)，及早期有裂隙发育，对油取代水也是有益的(Watts，1983)。所有这些油田均位于由蔡希斯坦盐丘对侏罗系页岩的底辟作用形成的构造高点上。有些地方由断层引起，早白垩世便开始流动。当白垩堆积时，运动呈脉冲状。运动强烈时期是从康尼阿克晚期延续到早古新世末使白垩产生裂隙，导致整体渗透率增至$12\times10^{-3}\mu m^2$(Sckolle，1977)。人们普遍相信油气来源于上侏罗统的启莫里阶页岩。

白垩并非颗石藻物质的简单聚集，而是不整合面上筛选过的白垩或者沉积后又作为滑坡物、碎屑流、浊流再沉积的白垩。白垩经筛选提高了渗透率。所有白垩渗透率均取决于粘土含量，干净的白垩(二次沉积的)具较高孔隙度及渗透率，而泥质白垩的渗透率较低。具较高粘土含量的白垩将形成盖层，现一致认为许多白垩储层都是再沉积形成的，惟此才能形成良好的储

层。白垩储层由于受到异常高压和天然气体本身压力的保护，也就免受成岩作用的影响。

六、新生代地层

北部北海盆地的第一个油田——蒙特罗斯（Montrose）油田是于1969年12日在古新统砂岩中发现的，初期可采储量（体积）$14\times10^6m^3$ 或 9000×10^4bbl（图3—59）。之后不到一年，又在其北面50km的弗蒂斯油田发现了大得多的古新统砂岩油藏，初期可采储量（体积）$300\times10^6m^3$ 或 20×10^8bbl。1971年又在英荷属区分界的下第三纪砂岩中，发现了世界最大的浅海气田之一——弗里格（Frigg）气田，可采储量（体积）$200\times10^9m^3$ 或 $7\times10^{12}ft^3$。现已清楚表明，北部北海新生界下部是一个重要的勘探目标。

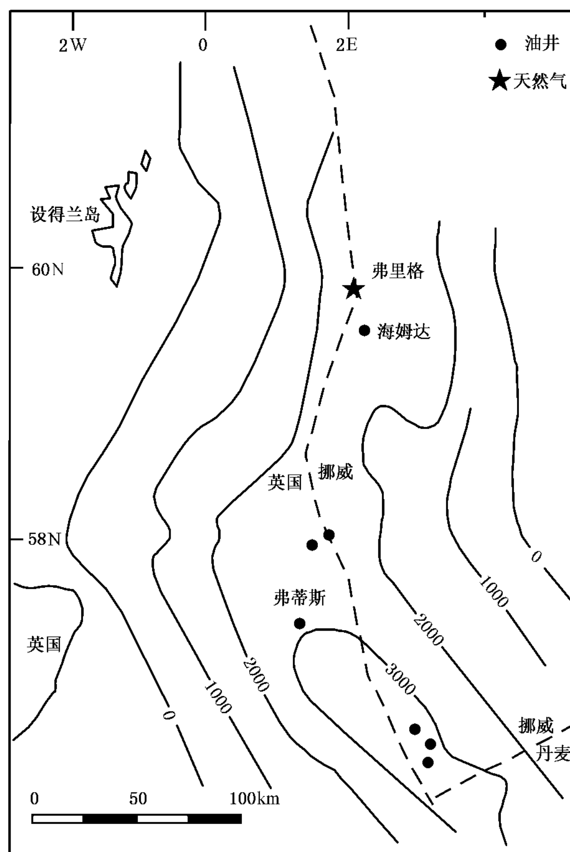


图3—58　北北海盆地第三系发现井及第三系底面构造等高线图（单位：ft）

北部北海的一幅白垩（chalk）层顶面的构造等高线图（图3—58和图3—59）显示出厚达3500m的新生界地层充填在一个大致呈南北向的盆地中，这一轴向与中生代的裂谷体系基本一致。新生界地层中未见断裂，仅有轻微变形。中北海和北部盆地第三系的标准岩性地层命名如图3—60所示，Deegan和Scull（1977）所编制的方案常被作为更详细工作的基础。

整个北海的古生物地层划分，都得到了下第三纪凝灰岩对比的印证，有两个主要的火山碎屑沉积时期，其一是距今58～57Ma，另一是距今55～52 Ma（Knox和Morton，1983）。后一期中的一个亚期形成了主要凝灰岩带。这是一个广泛分布的地震标志层（参见图3—60和图3—61）。

第四纪沉积已概括在Caston的著作（1977）中，图3—62等厚图即取自该文。中部北海一些地区的第四系，厚逾1000m。更详细的了解可见诸于地质科学研究所的一系列报告（如Owens，1977）。

北部北海盆地的英国属区和挪威属区新生界地层划分方案已被Berggren和Gradsfein（1981）所建立。King（1983）提出了详细的新生代微古生物地层划分方案，定出17个底栖生物带和16个浮游生物带，从晚古新世到晚中新世有3个重要的与深度相关的微体动物群生物带。

1. 沉积学和相的分析

中部北海古新统是由4个重要的砂岩单元所组成。Morton（1982）对维京地堑下第三纪砂岩的研究证实了奥克尼—设得兰台地区作为物源区的重要性，这里变质的基岩暴露于北端，

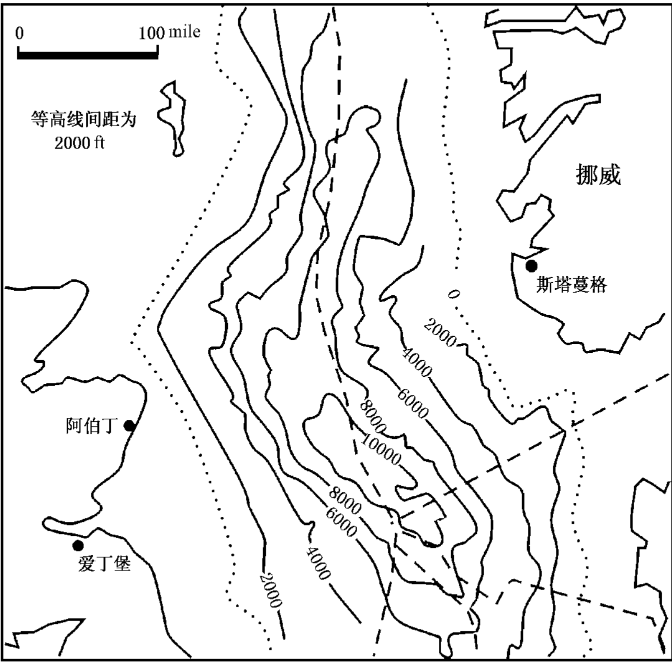


图 3－59　北北海盆地白垩层顶面构造等高线图

注:1ft＝0.3048m,1mile＝1.6km

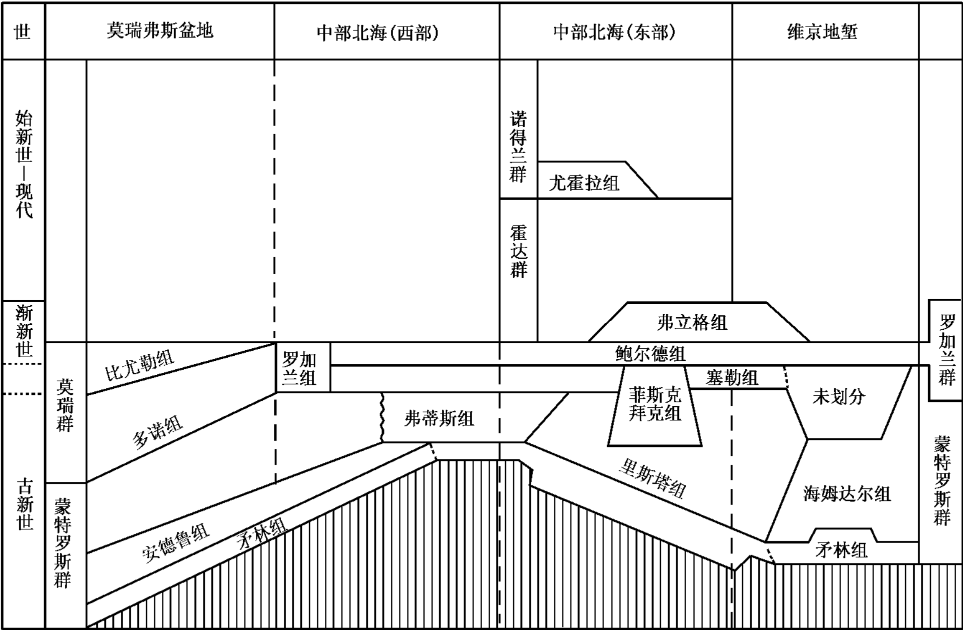


图 3－60　北北海盆地不同单元第三系地层名称及对比简图

晚侏罗世沉积则暴露在南部。

各种各样古新统砂岩的沉积相在建造岩石孔隙度梯度中的作用可概括为如下几种:①无结构砂岩颗粒流相,在 2300m 具有 20%～30%的孔隙度;②浊积相,在 2300m 具有 17.5%～22.5%的孔隙度;③海绿石砂岩,在 2100m 具有 25%～35%的孔隙度。主要产层是①和②两

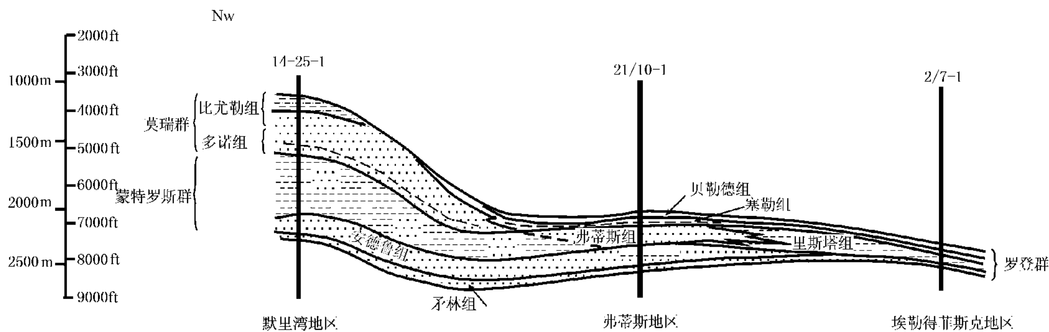


图 3－61　北北海盆地第三系区域岩性剖面图

图 3－62　北部北海盆地第四系等厚图(单位:km)

种类型，例如在弗蒂斯，安德鲁(Andrew)、蒙特罗斯和科德(Cod)等油气田，根据已发表的数据可知古新统砂岩的孔隙度及其变化梯度一般是按每埋深 1000ft 孔隙度损失 2.9%，折合每 1000m 损失 9.5%，对于弗蒂斯组来说，据 Carman 和 Young(1981)所提供的数据表明，在 2200m 处无论砂质浊积岩或块状砂岩的平均孔隙度都是 25%；而泥质浊积岩则为 17.5%，块状砂岩的平均渗透率是 $639\times10^{-3}\mu m^2$，砂质浊积岩则为 $418\times10^{-3}\mu m^2$；至于泥质浊积岩，仅

为 $8.6\times10^{-3}\mu m^2$。

中部北海下第三系剖面可大致划为顶积层、前积层和底积层等段。夹有褐色煤的厚层复合砂岩形成顶积单元，带有薄砂岩的泥岩形成前积单元，粒序砂岩和泥岩形成底积单元。顶积层被解释为浅海至沿岸平原相沉积物，前积层为近物源的底积层对等体，底积层为沉积在较深水条件的浊积相沉积物（形成了弗蒂斯和蒙特罗斯等油田的储层）。

关于北部北海古新世古地理的见解已表示在图 3－63 中。北部北海英属地区古地理演化的详尽情况也被 Sutter（1980）描绘出（图 3－64、图 3－65），Sutter 关于古新世古地理的见解十分接近于早期 Parker（1975）的解释（图 3－66），也同 Rockow（1981）从地震地层学所得的结论（图 3－66、图 3－67）大体一致。这些图表明了默里湾群浅水相与早些的蒙特罗斯群较深水相之间的关系。其物质供给来源于西北方，通过一个陆棚—三角洲沉积区到达维京地堑和中央地堑。以上虽是个粗线条的古新世格局，但是某些局部细节，特别是有经济意义的细节可以从中辨别出来，对于指导勘探工作是具有现实意义的。

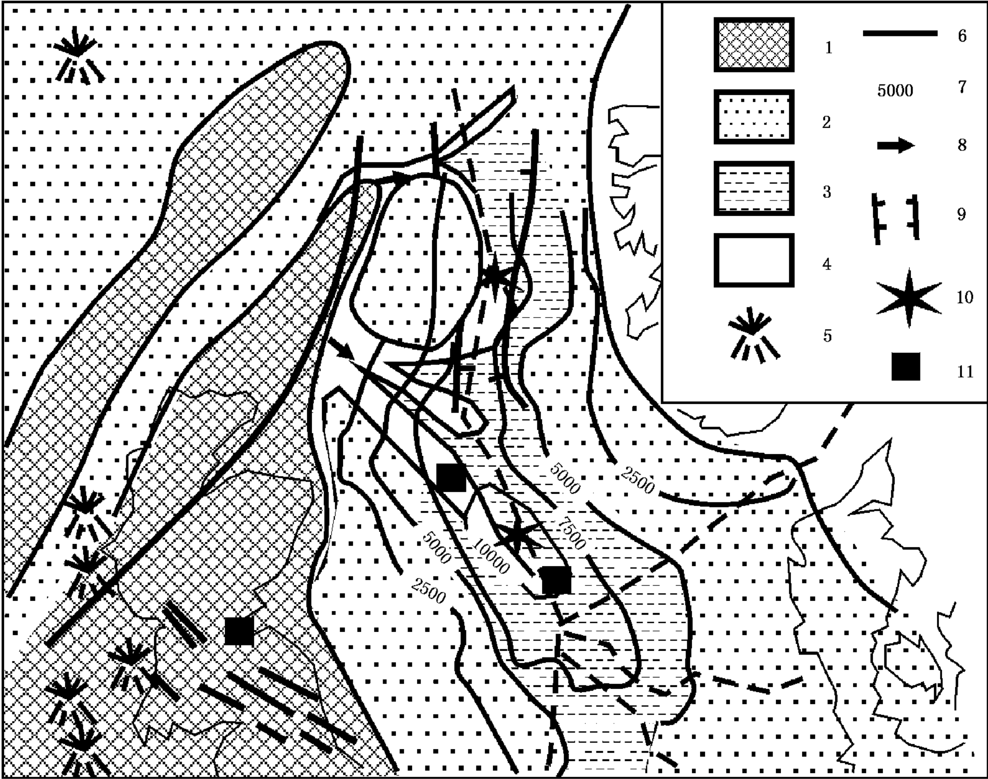


图 3－63　古新世古地理概貌图（据 Ziegler，1975）

1—陆地；2—陆棚沉积；3—深水沉积；4—浊积砂岩；5—火成中心；6—岩脉；7—第三系厚度（ft）；8—砂源；9—地堑；10—气田；11—油田

3. 相和储层地质

1975 年前，Parker 据 77 口井的资料加上广大的地震覆盖已能断言北海的古新统提供了一个“控制得较好的古代深水扇的例证”。后来弗蒂斯组的生产井提供了更详尽的情况。据所得的信息编绘了复杂的水下扇砂岩几何形态，它又反过来指导油藏作业和下一步的钻探。

中生代的沉降主要是由于大的断裂作用和裂谷作用，而新生代的沉降则是由于广阔的向

斜式拗陷作用。而且整个新生代的下陷是不均衡的，对中部北海可分出 4 个阶段：

(1)丹宁(Danian)期：北部北海盆地缓慢下沉，伴随着苏格兰的平缓升起；

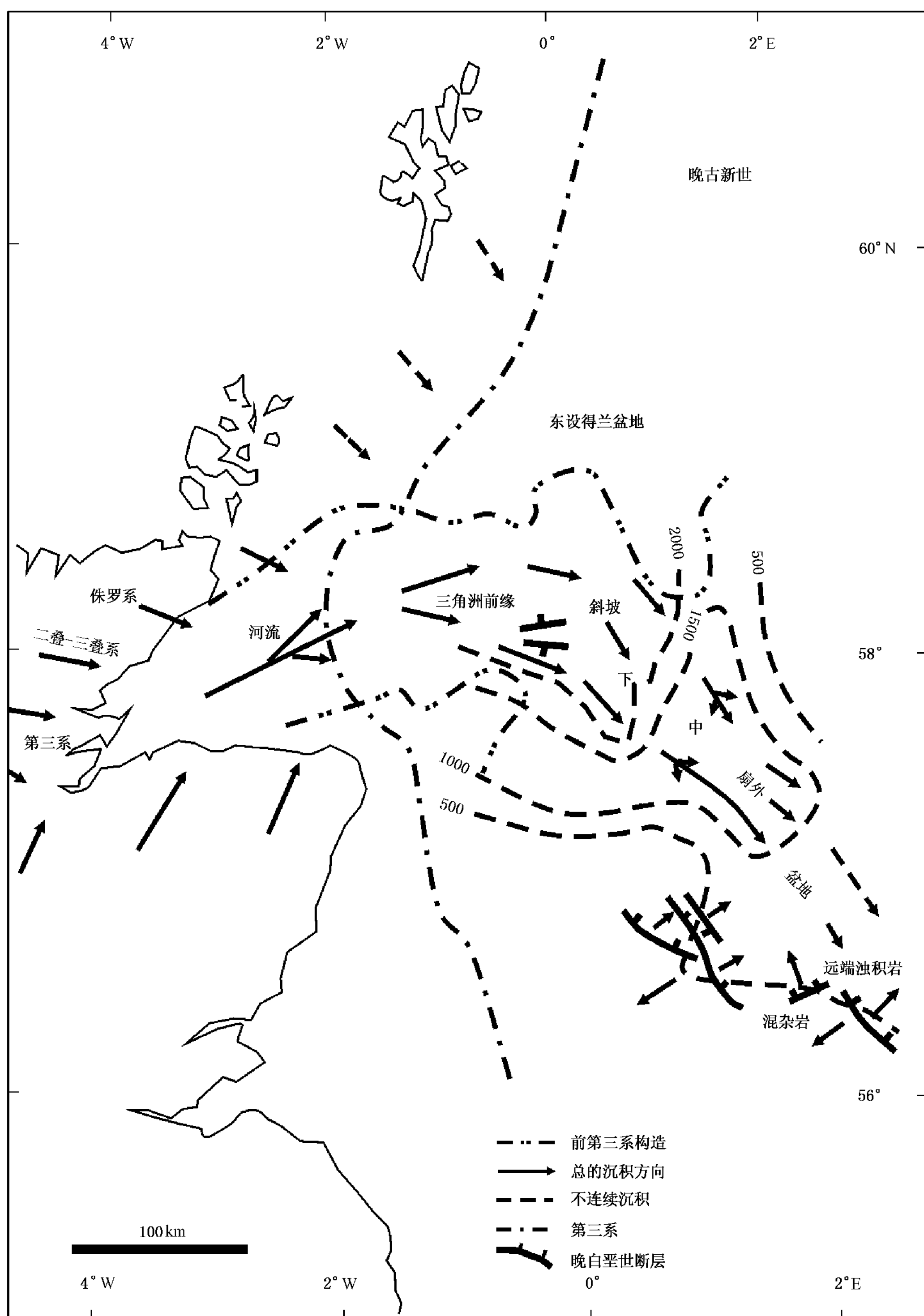


图 3－64　古新世晚期英属北北海区域古地理概貌(据 Sutter,1980)(单位:ft)

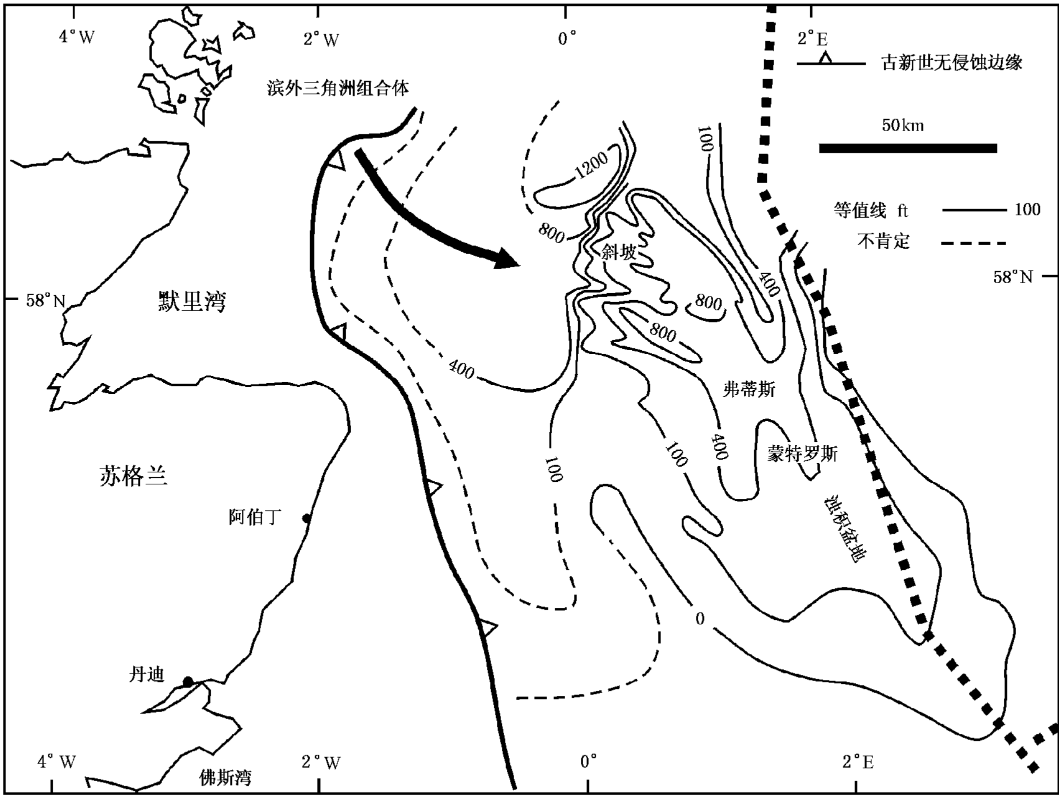


图 3—65 **古新统砂岩等厚线图和古新世古地理概貌图**

注:1ft=0.3048m

(2)**中和晚古新世:盆地迅速下沉,伴以苏格兰大规模的上升;**

(3)**始新世:盆地缓慢下沉,伴以从边缘向中心推进了沉积作用;**

(4)**渐渐世至今:整个渐新世水深减小,渐新世结束时,盆地范围最小。沉积作用速率从渐新世起有所增加,因此自那时起沉降速率存在着一个不规则的增长,北海第四系最大平均沉积速率是每年** 0.3~0.5mm,**比第三系的数字要高达** 10 **倍。**

与此显著下沉相关的特征,即表现出北部北海的古地温梯度也最大(Cooper **等**,1975)。**因此**,Cooper **等认为所记录下古温度都是属于一个地热事件造成的,即第三纪盆地的发展和充填。资料表明,在许多地方古地温梯度具有比今日所见为高的数值。而且某些地层目前正经历着它们的最高温度。**Barnard **和** Cooper(1981)**认为,在北海总的说石油的生成和运移发生在第三纪地热事件时期,随着连续的埋藏,这一作用持续至今天。最丰富最广泛的母岩是启莫里阶粘土。推测北海绝大部分的石油都是来自于它。但也有例外如弗里格位于气下面的油,它似乎是为深埋的下和中侏罗统母岩的早期阶段所生成。**

至于弗里格的气藏本身,也有证据说明是侏罗系母岩晚期阶段转化生成的,母岩的镜煤反射率值为 1.5%**到** 1.8%**正是成气带的特征。本区下第三系和白垩系的可能母岩成岩作用弱,镜煤反射率值在弗里格的深井中于** 4000m **深度仅达** 1.0%。

维京地堑的若干地方在早第三系砂岩中发现了重油。阿尔法(Alpha)**和布瑞赛**(Bressay)**构造就是重要的例子。**

在很厚的第三系层序中寻找砂岩,导致了人们对北部北海盆地的早期兴趣(Kent,1975)。

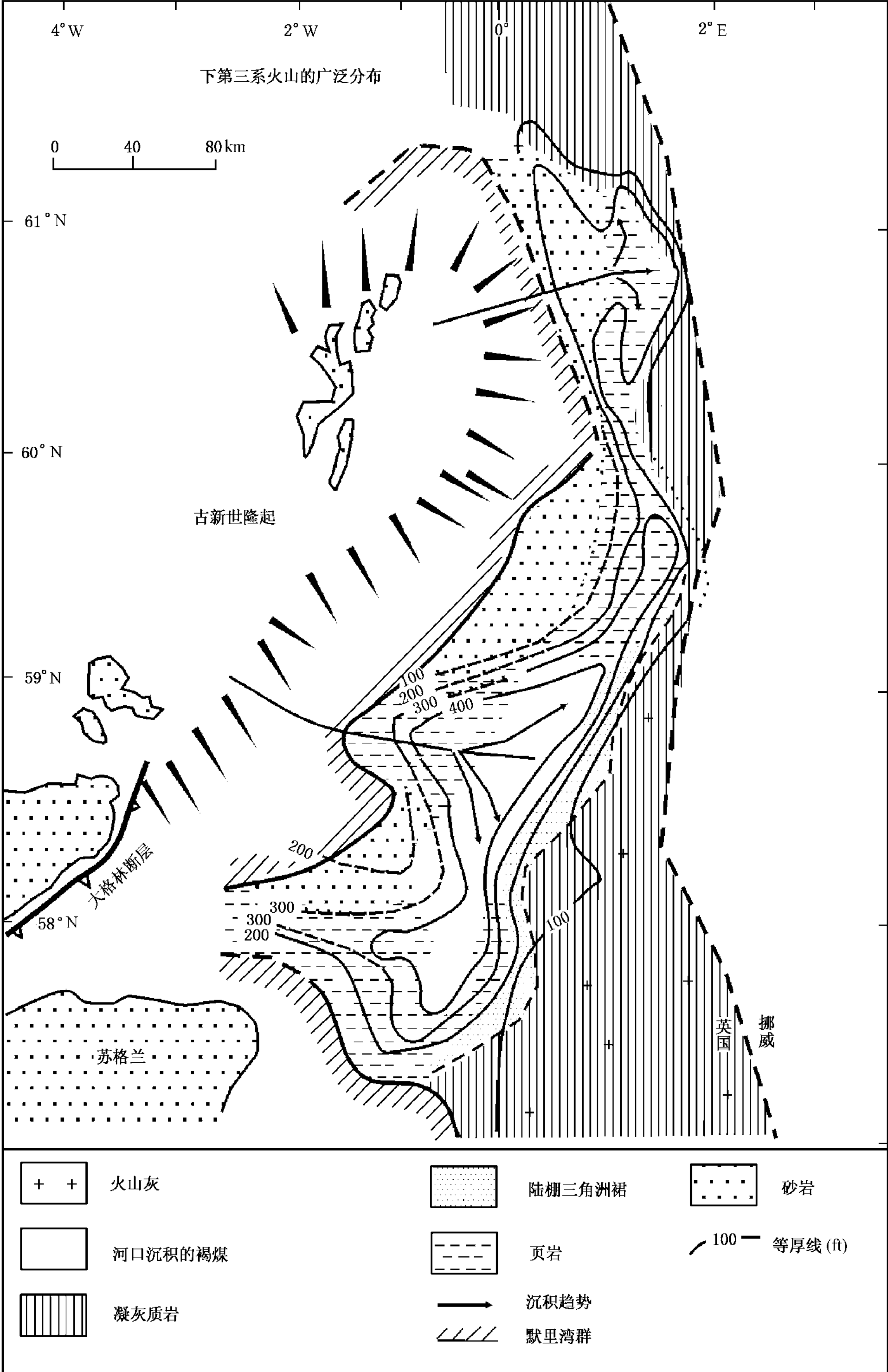


图 3－66　蒙特罗斯群古地理及等厚度图

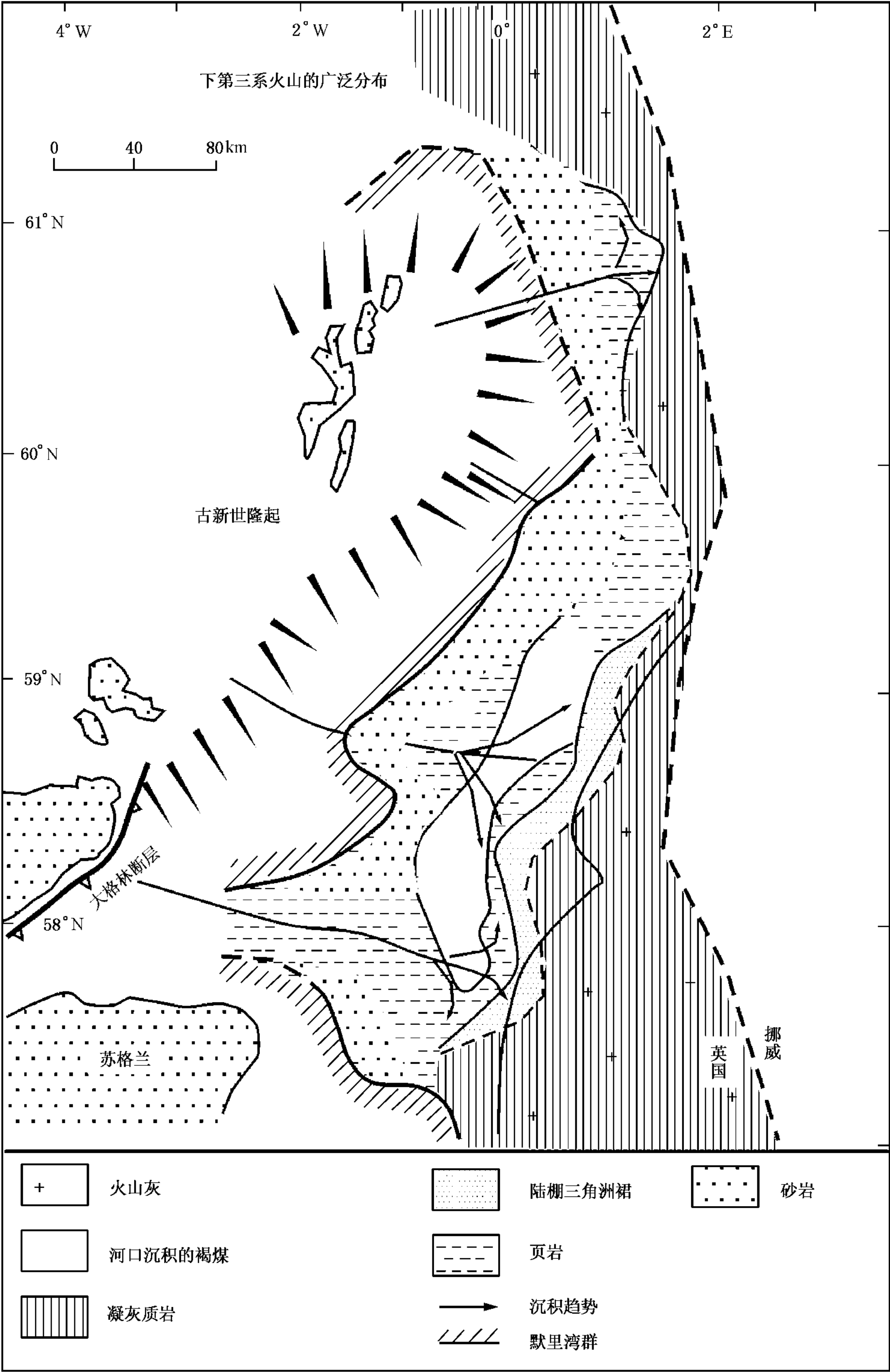


图 3—67　默里群和罗加兰群古地质和古地理概貌

1—Bolder 组：火山灰标志层，向北逐渐被默里群超覆；2—Beauly 组：河口沉积的褐煤；3—Sele 组：通常为凝灰质的陆棚—三角洲沉积与相似的盆地型泥质沉积；4—Sele 组和 Dornoch 组之间的过渡，陆棚—三角洲裙；5—Dornoch 组：未分开的陆棚—三角洲沉积，在陆棚边缘砂/页比高；6—沉积趋向；7—默里群的潜在露头边界

随后在勘探与开发期间对这些砂岩所做的详细研究无疑对该区石油勘探和开发的贡献是相当明显的。对整个盆地早第三系砂岩的进一步勘探，需要继续详细了解构造和海平面升降对浊积岩沉积作用的控制。因而要求对砂岩体几何学和孔隙形态学的描述与预测定量化。

第三节 盆地沉降的初步分析

北部北海盆地的大量勘探实践已提供充分的构造和地层描述（例如：Woodland，1975；Illing 和 Hobson，1981 ；Ziegler，1982；Glennie，1986）。然而，关于岩石圈和地壳运动过程对这个地区沉降所起的作用问题，尚存在争议。一种观点认为北海的沉降是随着地壳拉张的形成而进行的（Sclater 和 Christie，1980；Dewey，1982；Wood 和 Barton，1983；Borton 和 Wood，1984；Beach，1986）。另一种观点认为由横穿北海区的地震资料说明此区不存在大量的地壳拉张（Smythe 等，1980；Ziegler，1983）。现根据北海地质历史的实际资料（图 3－68）加以叙述和分析。

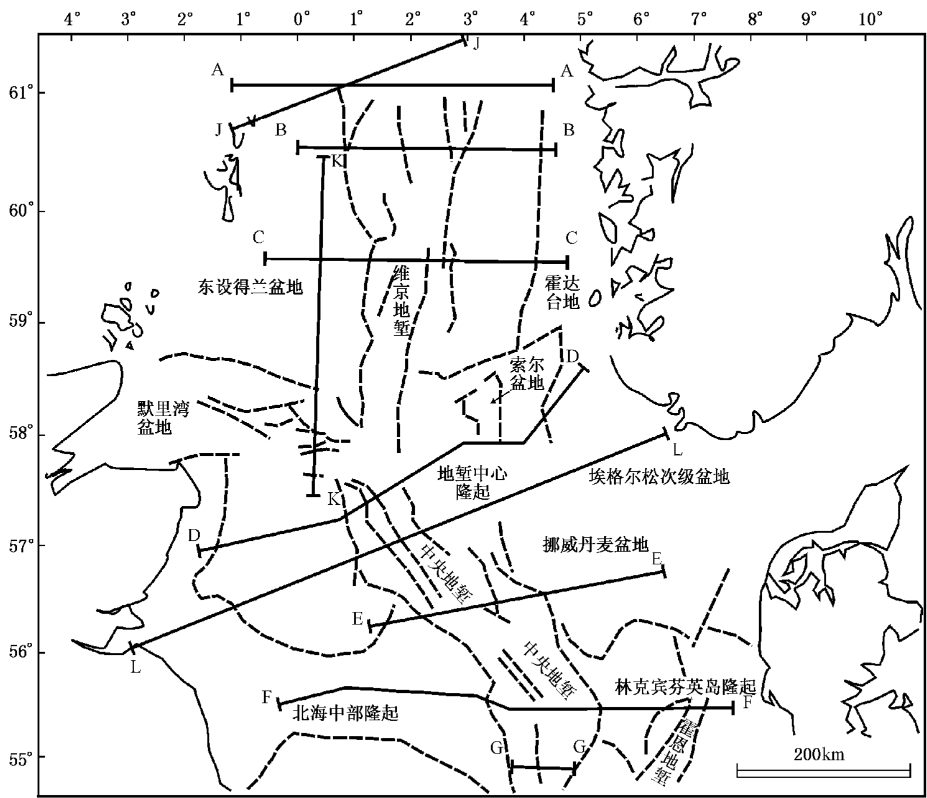


图 3－68 研究过程中使用的横剖面及所提到的构造特征位置（据 Ziegler 等，1982）

一、盆地（构造）沉降研究的基本方法

在描述北海演化过程中，所保存的地层记录仅间接反映了盆地演化的构造过程，地史分析能校正沉积物埋藏历史过程中的古水深和压实性。另外，回剥技术（Technique of Back Stripping）可估算海平面升降作用和由于沉积物载荷产生的沉降作用。假如沉积物载荷随着构造

沉降变化是符合局部艾里均衡现象的话，那么盆地沉降的任何区间，构造沉降（Δy）可以写成：

$$\Delta y = (\rho_m - \rho_g)/(\rho_m - \rho_w)\Delta R + \Delta W + \Delta WD + \rho_m/(\rho_m - \rho_w)\Delta SL$$

式中 ρ_m、ρ_g 和 ρ_W——地幔、平均岩石基质和水的密度；

ΔR——所观察的岩石等值线厚度；

ΔW、ΔWD 和 ΔSL——沉积体、水深和海平面升降过程中净厚度层段差。

通过北海钻井记录所做的沉降分析证明了回剥技术的重要性。

确定构造一般应包括下列几个步骤：①确定现在的地层厚度 S_i 和古水流深度；②根据目前的孔隙度和压力资料估量压实系数 b_i；③根据层段厚度 ΔS_i 和压实系数 b_i 估计岩石等值线厚度 ΔR_i；④根据沉积物载荷的历史和所计算的随孔隙度而变的层段渗透率模拟各层段内超高压的发展；⑤重复②－④步骤，改变层段的压实和渗透率系数，直到获得与目前所观察的压力与孔隙度最吻合的情况为止；⑥重复步骤④，应用每个沉积物载荷 ΔR_i 计算每个层段内有效压力的变化和沉积柱状剖面图内水的总变化 ΔW_i；⑦根据 ΔR_i、ΔW_i、ΔWD_i 和 ΔSh_i，计算每个层段构造沉降 Δy_i。从而即可进行构造沉降图的编制。

图 3－69 展示了 10 张构造沉降图，这些图构成描述从三叠纪至全新世北海沉降的基础。要估量这些图的准确性是很困难的，但是已有的研究都证明上述步骤形成的误差很小。图 3－70a是一张横穿维京地堑实际观察资料编制的剖面图。图 3－70b 是用 Schater 与 Christie 的方法所作的模式剖面，图 3－70c 是回剥技术所作的模式显示两者可基本对比的结果。最大的构造沉降出现在地堑上。

一般来说，盆地史可划分成两种沉降类型：①与活动盆地拉张有关的断裂控制沉降的裂谷期；②由于岩石圈变冷产生的区域性热沉降的裂谷期后。裂谷期沉降的总趋势是迅速加深，接着是构造沉降速率的周期性指数减小。裂谷期后的热沉降是沉降指数特征加大。对热沉降的有效试验是定量地测量随着时间变化产生沉降加速或减速的趋势。可以给出了一个特殊的有用参数——沉降凹面指数（c）。对任何沉降曲线，不论热形成与否，c 都可以被定义。减速沉降其指数为正数，反之加速沉降指数则为负。对裂谷期后热构造沉降 c 的期望值由下公式给出（5％以内）。

$$c = 0.004t^{0.9}$$

公式中的 t 大于 15Ma。它是指裂谷期以后的时间，单位以 Ma 表示。

盆地形成的拉张模式还可预测裂谷盆地地堑区下面莫霍面的抬升情况。通过简单的均衡补偿理论，把 M（莫霍面起伏量）写成：

$M = 22.17E$，E 为横穿盆地地壳扩张量。

具有巨大地壳拉张的裂谷中还有明显的热力学的历史特征。尤其是与盆地裂谷作用有关的热异常和衰减，由于岩石圈挠曲作用随时间和位置的变化而变化，因而需了解岩石圈通过弯曲应力（它的弯曲刚性）承受载荷作用的能力。假如下部地壳或上部地幔的热能使石英和橄榄石发生高温蠕变的话，那么弯曲应力会降低。由于沉积岩中弹性应力的迅速释放，因而盆地沉积物厚的地方其刚性也就会减弱。在挠曲和蠕动的观察方面，实验室里已经测出了挠曲刚度（弯曲刚度），它是受沉积物基底下面 450℃等温线深度所控制的。其 $Z_{450℃}$ 为：

$$Z_{450℃}(\text{km}) = 2.24E - 9D^{1/3} + B$$

公式中 D 的单位是 10^{-5}N/cm，B 是基底的深度，这种相关性往往用于盆地发展期间，随着时间的变化预测的 450℃等温线的深度和弯曲刚度的（D）值作比较。在拉张系数较大的地堑区给出到达 450℃等温线深度最佳的近似值：

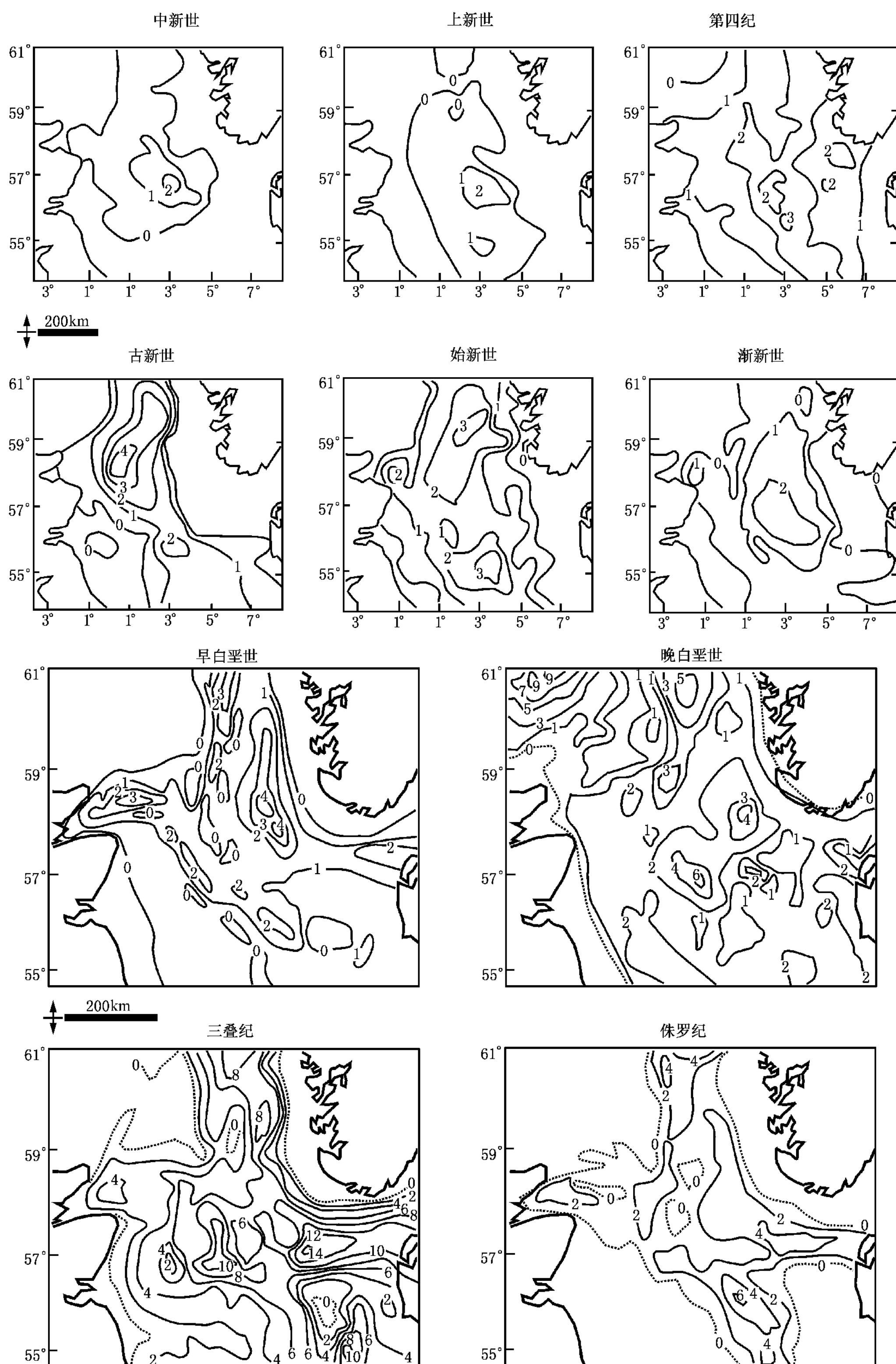


图 3—69　**北北海盆地中新生代地层构造沉降图**(**单位**:km)

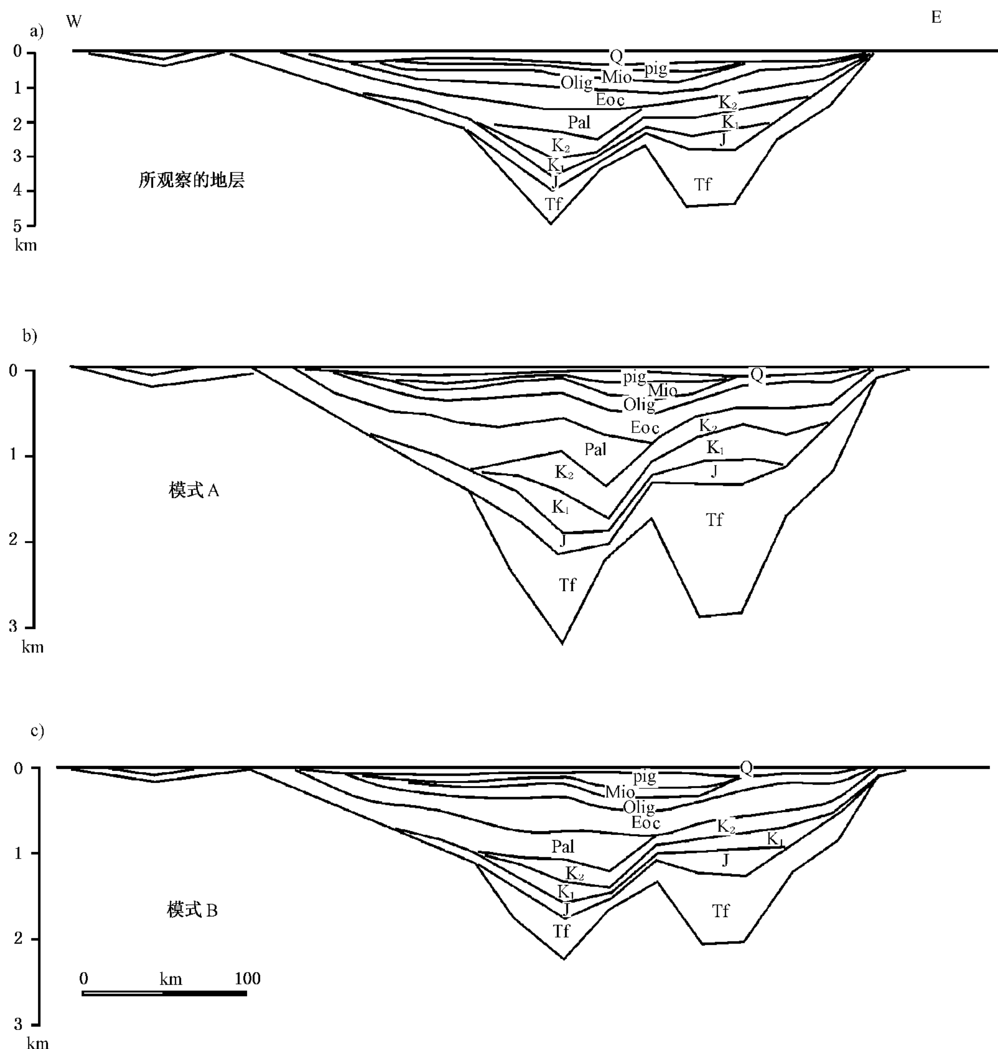


图 3－70　北北海盆地横穿维京地堑的剖面图

a—实际观察的生物地层信息所作的横穿维京地堑（北纬 59°）外延横剖面图；b—用 Schater 和 Christie 方法作所同（a）地区的横剖面图（模式剖面）；c—用回剥技术所作的同于（a）地区的横剖面图（模式剖面）

$$Z_{450℃}(\mathrm{km})=2.8t,$$

t 大于 20Ma，指裂谷停止之后的时间。例如，裂谷期后热沉降期间，裂谷之下到达 450℃等温线的深度随岩石圈的变冷逐渐增加，随着 450℃等温线的加深，岩石圈的挠曲刚度是累进增加的。

根据下列两种方法中的任何一种可得到挠曲刚度估计值（D）：①自由空间重力异常和大地水准面异常；②盆地载荷体分析（Thorme 等，1985）。

按方法①中，求得的弯曲刚度与盆地沉积物的弯曲补偿模式所预测的重力异常和横穿盆地观察到的重力变化一致。根据此方法推断的刚度反映了对沉积物载荷均衡补偿的平均值。因此，在盆地刚度方面，得不到任何信息。

然而，第②种方法，载荷体分析可获得不同时间/地层区间的刚度估计值，可根据观察盆地地层不同方法推断出刚度。

下面将根据上述的基本概念，分析北部北海盆地的发展以便估价此区拉张模式的适用性，将分别讨论中央地堑和维京地堑的演化明确这两个单元的不同之外。

二、中央地堑的演化分析

1. 裂谷阶段

沉降分析的第一步是把盆地的演化划分成断裂控制沉降为特征和以区域沉降为特征的周期。对中央地堑裂谷活动主要时期的时间，通过横穿盆地的地震反射剖面建立了起来。图3－71中已区分出二期拉张，晚二叠世至早三叠世期间的横剖面上出现的第一期拉张；要比侏罗纪中期至白垩纪早期的第二期拉张更具重要性。

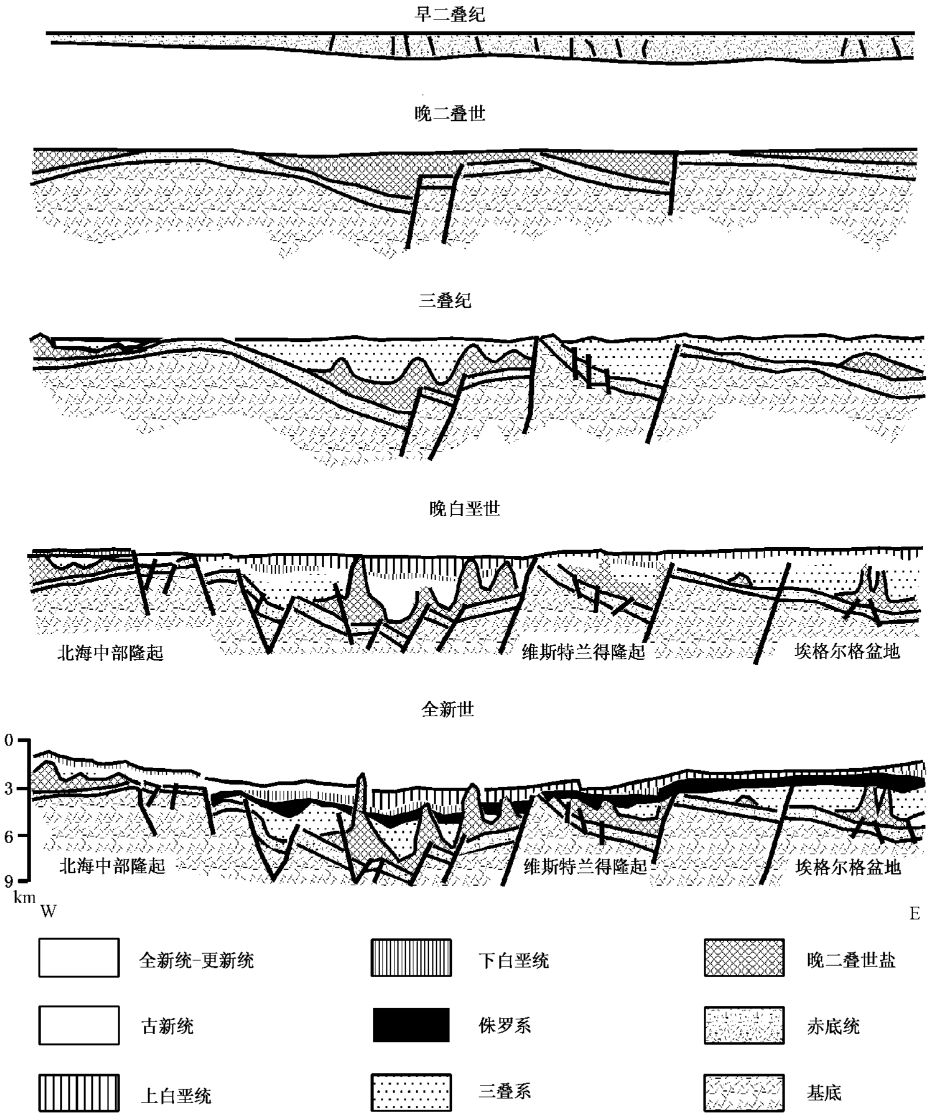


图3－71　横穿中央地堑的早二叠世以来的恢复横剖面(图3－69中E－E′剖面)

2. 区域沉降

在中央地堑区的晚白垩世和第三纪则形成了在下伏地堑系上面的宽阔区域凹陷。确定断

裂控制区域沉降的变化时代是从阿尔比—阿普第期。在中三叠世—早侏罗世及早二叠世期间无主要正断裂作用存在(Ziegler,1982)。

因此,中央地堑区的历史似乎是在局部性地堑形成期与区域盆地沉降期之间交替出现。二叠纪以来的裂谷期多半出现在晚二叠世至早三叠世,中侏罗世至白垩纪早期,局部到第四纪。

如前所述,地壳拉张模式能预测周期性的紧随每次裂谷事件的区域沉降。从中央地堑区的观察此模式较好。Wood 和 Barton(1983)认为:中央地堑发展过程中具有二期拉张。Sclater 等(1987)认为:在石炭纪时还有较早的第三期,遗憾的是认为拉张期数越多,时期不同裂谷阶段的拉张量和时间估计越显得勉强。因此就必须近一步了解中央地堑内地壳拉张的一些其他证据。

3. 基底拉张

以地壳拉张为主的盆地中,基底断裂的总拉张 E(km)和构造沉降 V_T(以裂谷单元长度的 km^2 计量),按下述公式表示:

$$V_T = 7.83E$$

使用这种相关性公式,在中央地堑区估算了北纬 54°~58°之间的 E 和 V_T。通过做中央地堑主要的断裂断面平面图,获得了总的拉张量。图 3—72a 是实际观察到的蔡希斯坦世时期的总拉张情况,从中可以估算其构造沉降量。图 3—72b 是按上述公式预测的沉降与所观察的北纬 54°~58°之间沉降的比率。由于正断层拉张量的不确定性,故采用了比率的最大和最小估算值表示之。

基底拉张百分率的计算结果表明,在北纬 56°以北的构造沉降包括挪威—丹麦盆地增加了总的构造沉降,但对横切主要基底断裂的东西向拉张的估计值没有增加,提示盆地形成的其他机制曾有助于这个地区的沉降,尤其是在挪威—丹麦盆地内。

4. 地壳结构

横穿中央地堑的剖面图(图 3—68 中的 LL 线)显示,在狭窄的接近于地堑轴部的地方,莫霍面有明显上升(图 3—73)。穿过这个剖面的构造沉降 V_T 和莫霍面的起伏量为 800 和 1000km^2。根据地壳拉张模式预测莫霍面形成的构造沉降非常小,这个结果表明引起盆地构造沉降的其他因素在北海中央地堑区演化过程中也起着重要的不可忽视的作用。

Barton 和 Wood(1984)根据折射地震解释指出,速度结构的明显变化与从西到东横切中央地堑地壳密度变化相一致。图 3—73 是沿着 LL 地震测线横切中央地堑所作剩余重力异常剖面图,该剖面已经校正(水深、沉积物载荷和莫霍面变化影响),因而,这些异常反映了地壳和上地幔中垂向上的密度分布,而不能用来解释莫霍面的起伏情况。

5. 侏罗纪后沉降的形成

许多学者指出,中央地堑侏罗纪后的构造沉降可主要用岩石圈的热变冷来解释。从早白垩世至上新世,地堑内的构造沉降速率不像典型热沉降那样的下降特征。根据凹面指数,其沉降接近恒定或是加速的(图 3—74)。

白垩纪和第三纪的构造沉降图(见图 3—69)显示,裂谷期后盆地曾有几次短的构造静止期。主要构造沉降中心出现和消失在相对较短的周期中,第四纪看来是一期新的盆地沉降。这些结果表明,热沉降仅仅是中央地堑在白垩纪和第三纪期间盆地演化的一部分。

6. 弯曲刚度

Barton 和 Wood(1984)把所取得的自由空间重力资料与白垩纪以来的构造沉降和沉降载荷方面不同程度弯曲补偿模拟与重力相比较后获得了中央地堑区的估量刚度,$D = 10^{23}$ N/cm 的最佳拟合值。按前述最佳近似值公式和所观察的刚度计算出有效裂谷年龄要少于 20Ma,

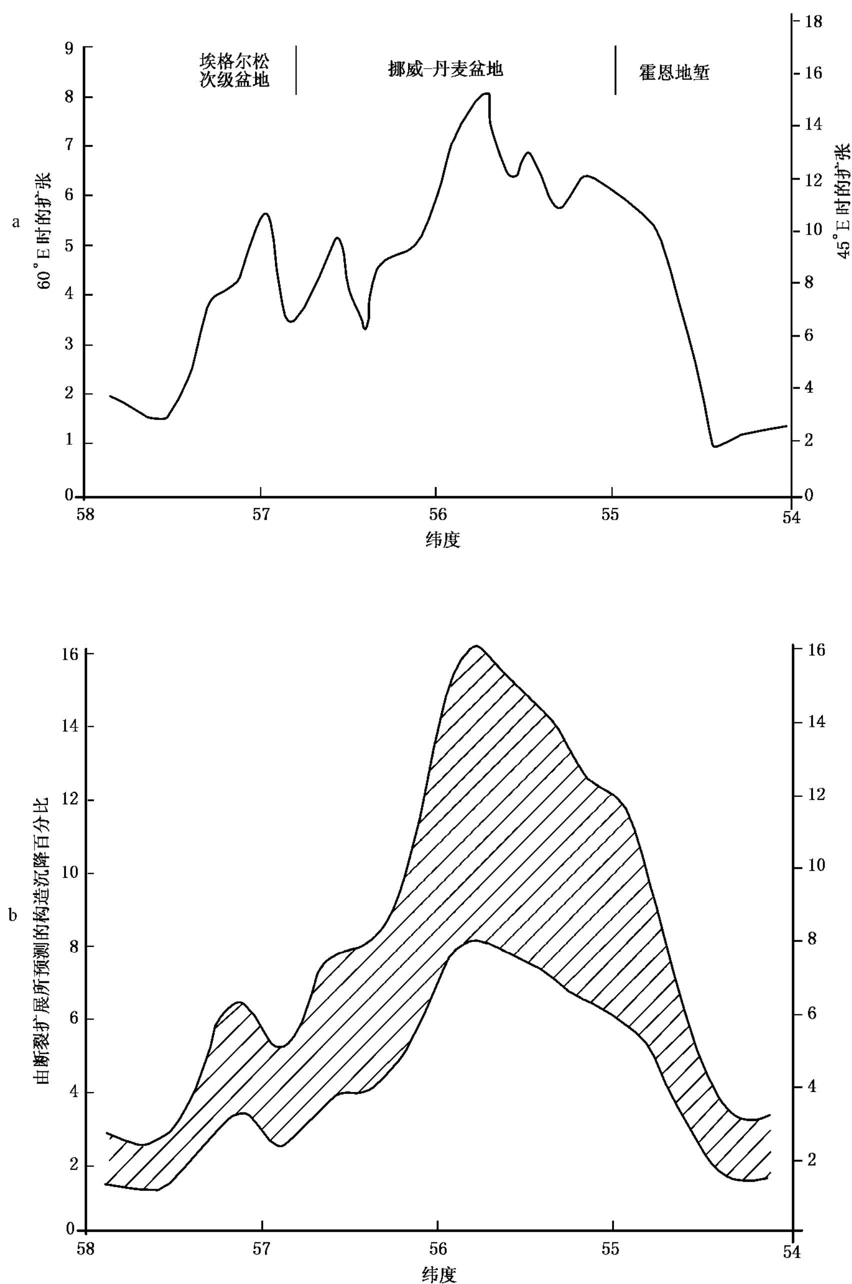


图 3－72　中央地堑的总扩张与纬度的关系

a—根据实际资料作出的沉降；b—据公式关系预测的沉降

假如中央地堑的最后热事件发生在白垩纪早期裂谷作用期间的话，则根本不可能是这个值了。

对于所观察到的低刚度值的一种可能解释是，晚新生代期间中央地堑发生热复活，为检验这种可能性，通过 3 种不同方法的分析，结果表明在各方法之间具较好的一致性。其刚度显示从上白垩统至上新统，其值稳定地减小。从 Barton 和 Wood(1984)的重力研究中推导的低刚度值是与第三纪期间弯曲刚度的逐步下降是一致的。认为热复活曾导致了中央地堑还在进行的均衡的再次平衡，因此，目前几乎没有完整的均衡补偿。来自重力研究方面的低刚度估计值

残余重力异常

Mgal

距离(km)

莫霍面

图 3—73　通过中央地堑的剩余重力异常图

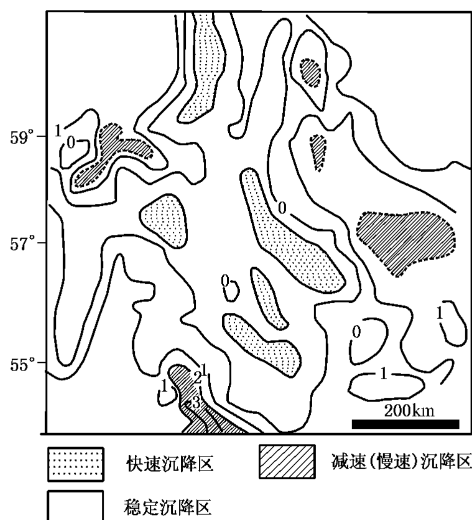


图 3—74　北北海盆地早白垩世—上新世期间构造沉降特征图(单位:km)

可能反映了最后一期的再次平衡。

三、维京地堑的演化分析

维京地堑长期以来一直被看做是一个裂谷型盆地,Alvarez(1985)在研究北部北海的沉降时,作了 7 张盆地内的构造沉降图。通过工作,用横切盆地的地震反射剖面图建立起来了维京地堑断裂运动的主要周期时间。图 3—75 示意性地综述了这些研究成果,图上可以区分出 3 期拉张断裂,分别是早三叠世、侏罗纪中期至白垩纪最早期和白垩纪最晚期至古新世。

1. 三叠纪沉降

它是在一个宽阔的区域沉降盆地内,由宽约 50km 的下落轴状地堑组成,由剖面(图 3—75)可以看出三叠纪期间,维京地堑由于正断层作用引起了近于有 20km 的基底拉张。表 3—7 给出的对三叠纪所预测和观察的构造沉降值的相互比较。所观察的构造沉降值要比预测的同生裂谷沉降值明显的增大。与预测的总体构造沉降大致相当。这种差异表明,在三叠纪沉降中裂谷期后的热沉降是一个重要成分。事实上,所观察的盆地地层基本与 Cochron(1983)的狭窄裂谷构造二维拉张模式相似,表明在狭窄的地堑系中热沉降可以在裂谷期发生。

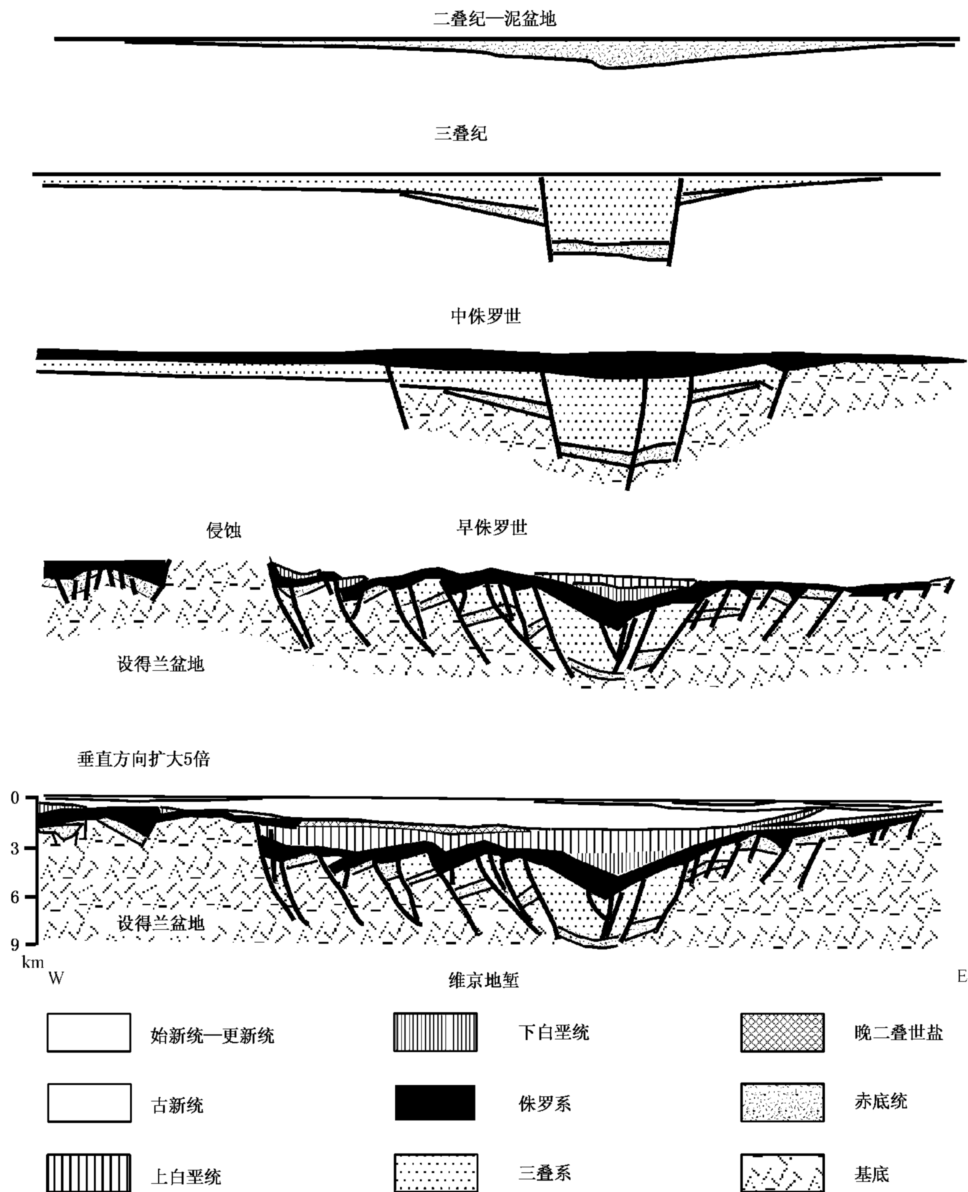


图 3—75　维京地堑泥盆纪以来构造发展横剖面图(图 3—90 中 A～A' 位置)

表 3—7　北北海盆地拉张与构造沉降之比

时　代	E(km)	V_1(km^2)	V_2(km^2)	V_T(km^2)	V(km^2)
三叠纪	20	70	90	160	180
早侏罗世—早白垩世	45	100			130
总　计	65			500	500

注:E:**代表总拉张量**(**观察**);V_1:**代表第一期构造沉降**;V_2:**代表第二期构造沉降**;V_T:**代表单元的总构造沉降**;V:**代表观察的构造沉降**

2. 侏罗纪和早白垩世沉降

维京地堑最大的断裂拉张发生在侏罗纪中期至早白垩世(图 3—75),典型的断块几何形态是沿犁式正断层作旋转并伴有走滑运动。这个 200km 宽的裂谷盆地,所发生的基底拉张平均约为 45km。

侏罗纪中期至早白垩世期间预测的和所观察的构造沉降比较值列在表 3—7 中。观察的构造沉降值基本上等于所预测的同期裂谷沉降值,这说明,可以用所观察的这一期间的地壳拉张解释北部北海侏罗纪中期早白垩世的裂谷期。

3. 晚白垩世和第三纪的沉降

许多学者都曾提出北部北海晚白垩世和第三纪沉降可以用裂谷或裂谷期后的岩石圈热冷却来解释。古新世和上新世期间通过海平面升降变化校正(图 3—76)在维京地堑内的构造沉降凹度范围在 0.2 和 0.4 之间,这与同期沉降的热冷却成因相一致。遗憾的是晚白垩世构造沉降的凹度依现有资料还不能做出评价。因为这种局限性,只好选用 0.3 作为裂谷期后沉降的平均凹度,从而确定热沉降开始于 121Ma(早白垩世内)。

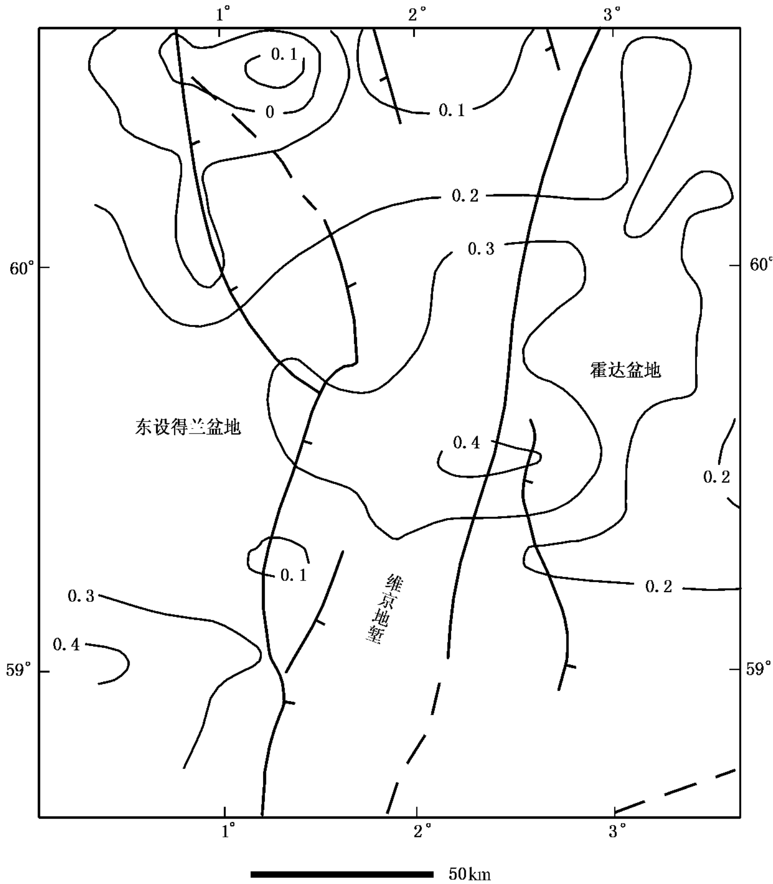


图 3—76　北海北部古新世—上新世时期构造沉降凹面指数

4. 第三纪沉降

中生代的沉降主要为断裂和裂谷活动引起,新生代则为广泛的向斜坳陷。Sutter(1980)认为整个新生代未出现均一的沉降,并识别出 4 个阶段的沉降。

(1)丹尼期:北海盆地缓慢沉降,伴随苏格兰的轻微隆升。

(2)早第三纪中晚期：盆地快速沉降，苏格兰大规模隆升。

(3)始新世：盆地缓慢沉降，沉积作用从边缘逐步向中心推进。

(4)渐新世开始：渐新世时水深减小，在期末盆地的范围达到最小，而从渐新世开始，沉积速率加大了。

5. 第四纪沉降

第四纪构造沉降图(图3—69)显示了维京地堑的东侧有一条长的裂谷形条带，目前的地震资料辨认出可能是第四纪裂谷作用，表明它比第四纪沉降具有更为强烈的重大事件。

6. 地壳结构和弯曲刚度

横切维京地堑的地壳拉张可根据裂谷下面的莫霍面高度来确定。在横穿维京地堑JJ线上折射剖面能观察到莫霍面上面30km的$2000km^2$面积的起伏，根据预测的面积/裂谷线性长度之比为700km其关系为：

$$M(2000km^2)=2.83V_T(700km^2)$$

这个结果和所观察估计的$510km^2$的构造沉降(表3—7)值是近似一致的。这种一致性有力地支持了此种地壳拉张模式。

通过观察的自由空间重力(图3—77)与自三叠纪以来的构造沉降和沉积载荷方面不同程度弯曲补偿的模拟重力相对比，获得了维京地堑估计的刚度$D=10^{25}$N/cm。把这个值代入前述有关公式中，预测出达到450℃等温线的深度是在沉积基底下22km处。要解释所观察的刚度及用前述公式得到的B值相当于8km，则有效的裂谷年龄是117Ma(早白垩世内)。因此，所观察的维京地堑的刚度是与晚侏罗世/早白垩世裂谷相一致的，而此期在地堑内部的地壳拉张起主要作用。

7. 第四纪活化作用

北部北海的沉降分析表明，该区第四纪是一个异常低弯曲刚度值和具有异常高速区域构造沉降的时期。

第四纪沉降被解释成是由于区域性温度的增高所引起的。据已发表的地热梯度和井中温度资料，做了一张北海的热流图(图3—78)。其表示的热流变化与Andrews—Speed等(1984)在北海西部所做的工作是一致的。这些作者曾指出热流值在数千米沉积物的上、下部是很不同的，上部数千米厚沉积物下面的热流变化与这里所给出的热流是较一致的(图3—78)。

第四纪构造沉降的形式，似乎与热流的变化有关，如西荷兰盆地、中央地堑的下部和上部，维京地堑的东翼和霍达台地都是第四纪沉降中心和高热流区。表明不同的第四纪沉降或隆起与异常高热流地区相关，说明第四纪是一个活跃的热复活时期。依据这种构造背景，热升高明显地与沉降加速或构造转变有关，这就进一步支持了根据重力资料对这种构造的解释。

图3—78是根据实际测量的结果编辑的北海盆地自由空间重力异常图。在北海自由空间重力中，许多短的波长可能是由花岗质和镁铁质的深成侵入体引起的。在北海中部和北部根据航磁测量可辨认出局部基底火成侵入岩，在图3—78自由空间重力异常图上就可辨认出4块这样的物体。

中等波长(>50km)的重力异常一般与表层载荷体的弯曲补偿有关(Karner，1982)。对于沉积盆地的重力异常来说，地壳总的弯曲是由于沉积物重量的载荷程度所提供的。自由空间重力的中等波长与至基底的深度的最大相关可用来转换弯曲刚度和它的空间变化。

用回剥技术所得的横切北海的现今弯曲刚度的变化(图3—79)，正如预计的那样，低值的弯曲刚度区与高于平均热流值的地区有关，然而，具有弯曲刚度高值区与低热流值区有关。

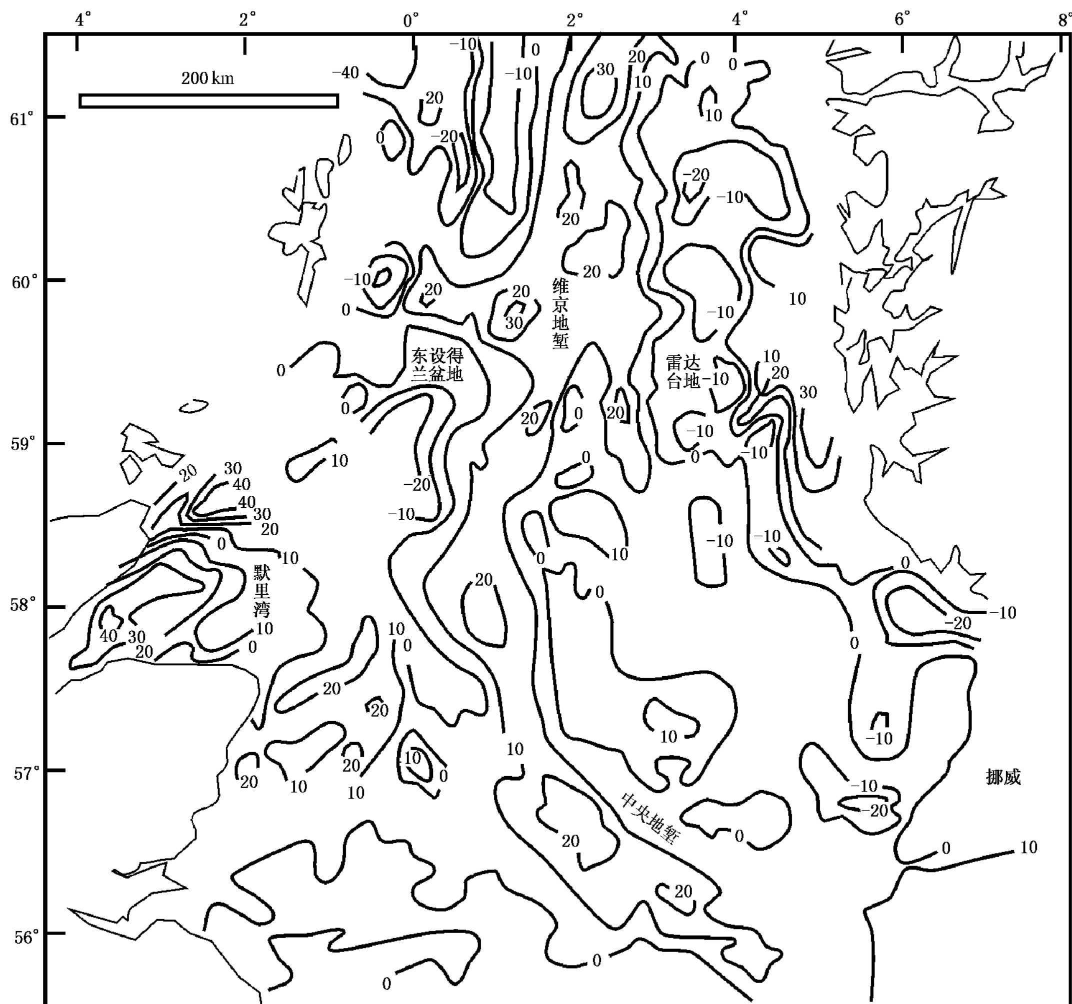


图 3—77　北北海盆地自由空间重力异常图

（以 10×10^{-5} m/s^2 为区间绘制的）

新生代期间弯曲刚度的不断降低和这期间的构造沉降说明，热复活和构造活化开始于第三纪早期。第四纪在这一方面表现为构造下降期的最高峰。

四、问题讨论

1. 裂谷模式的意义

关于北部北海的裂谷形态风格，是可以部分用加里东运动阶段和华力西运动阶段所遗留下来的主要不同点来解释。北部北海的结晶基底主要由一条加里东期形成的北东向延伸并且分支的高级变质岩石组成，其南部基底总体上是由低级（钻井取得的样品为绿色片岩相）加里东阶段的一条东西延伸的变质岩所组成。其盆地古生代后期演化情况，可能是另有控制因素。正如不少学者提出了北部北海裂谷构造的控制因素，是由于加里东基底的地势趋向形成的（Therlfall 等，1981）。Middleton(1980)认为，深部地壳的变质作用可能是被动边缘或地壳变质作用引起的沉降，受到下列一些了解甚少的因素影响：①有限变质作用反应的动力学；②绿色片岩—角闪岩＋水反应的净体积变化；③变质流体从地壳内渗滤至盆地表面要花多长时间。

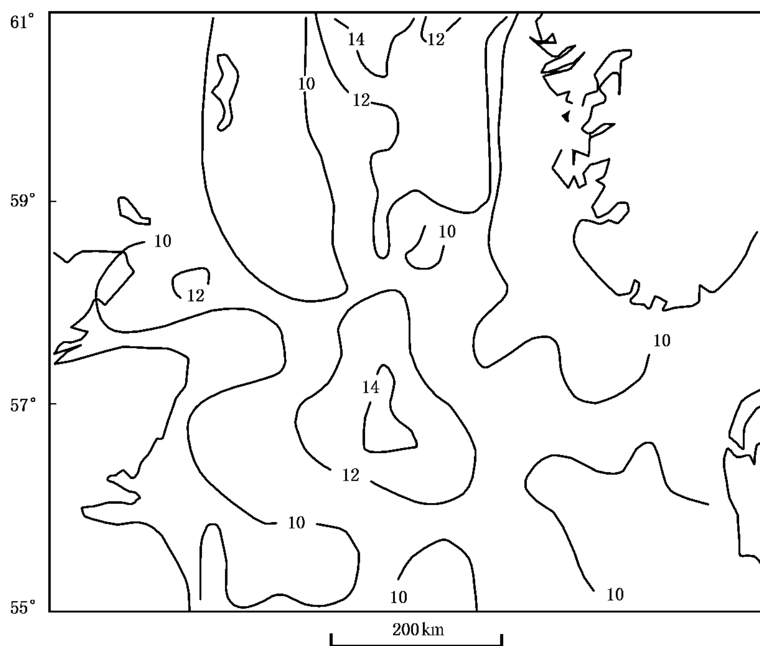


图 3—78　北北海盆地基底热流图

（据井孔中确定温度梯度绘制的）

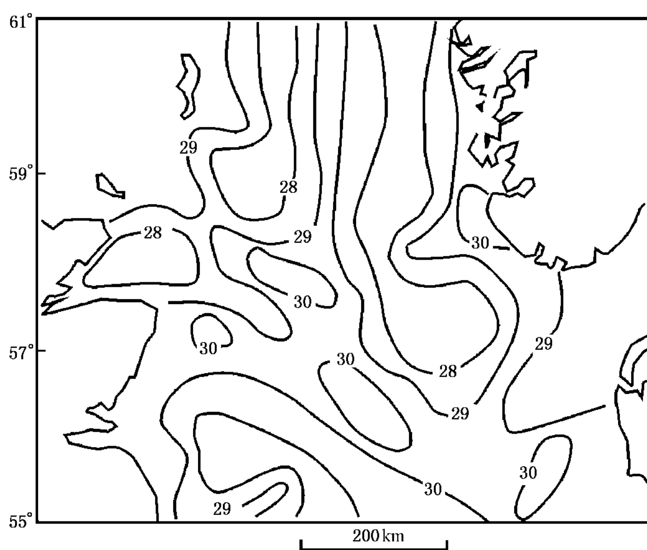


图 3—79　北北海盆地挠曲刚度图

（由重力置换和总构造沉降得出的目前刚度值绘制的）

注：等值线上数据，如 38 即为 10^{38} dyn/cm；29 即为 10^{29} dyn/cm，以此类推

根据 Barton 和 Wood（1984）的折射研究成果所推断的横穿中央地堑地壳密度结构的巨大横向变化也表明，与绿色片岩—角闪岩和玄武岩—榴辉岩变质作用有关的密度变化可能是重要的地壳演化因素，密度结构的变化可能从加里东到海西期地壳演化中得到继承。然而，对于大部分地区，这些变化补偿表明地壳密度变化是一直在进行的作用。Ziegler（1982）在推测西欧和中欧盆地中裂谷作用的几个不同旋回的原因时，提出了基本的控制因素是多期异常活动的

软流圈对流。按他的观点，在对流期间，地幔对流对上覆板块形成拉张裂谷的应力。与此同时，热软流圈介质进入地壳—地幔边界引起了地壳—地幔边界向上位移，以至影响下部地壳诱发出热的物理化学"作用"。可惜 Ziegler(1982)的模型要定量测试是很困难的，Throne(1985)首先提出该模式的过程。他用数字模型检查了所有地壳/岩石圈拉伸的构造沉积影响，软流圈对流异常活动引起了盆地的发生发展。虽然模拟的地层(图 3—80)类似于通过中央地堑的横剖面，然而需要定量说明作用的许多未知参数，仍然是困难的。

2. 对热成熟的预测

为了预测源岩成熟度的成熟时间和分布范围，常常企图做盆地沉降的地球物理模拟试验。Guidish 等(1985)和 Welte 等(1983)描述了一个结合流体流动的构造盆地模拟和有机地球化学特征的预测烃成熟度的综合三维数值模拟。问题是这些复杂的模拟是否能避免包括预测温度和成熟度历史在内的不确定性。对成熟度的模拟来说，北海不失为是一个理想的盆地。多数油田的主要源岩已被肯定而且生油层数量不多。此外，含烃区与晚侏罗世启莫里阶粘土的埋藏深度明显相关。表明垂向运移是石油聚集的主要途径。

Goff(1983)使用常规或可变的热流值观察了维京地堑中的镜质体反射率，采用的是 Mokenzie(1978)的地壳拉张模式，它是从热流模式或按 Ween 使用的随时间而恒定的热流模式来拟合维京地堑的镜煤反射率。这两种情况所计算的成熟度指数和镜质体反射率之间的关系再校正都可与其实际成熟度资料较好地吻合。根据所绘制热流变化、沉降史和压实系数图，已经在北部北海重复进行了试验(图 3—81)。根据 Waples(1980)所计算的洛帕廷成熟度指数值用来作为预测石油生成的不同程度情况。然而在模拟参数不确定的范围内，恒定和可变的热流模式都不能排除。

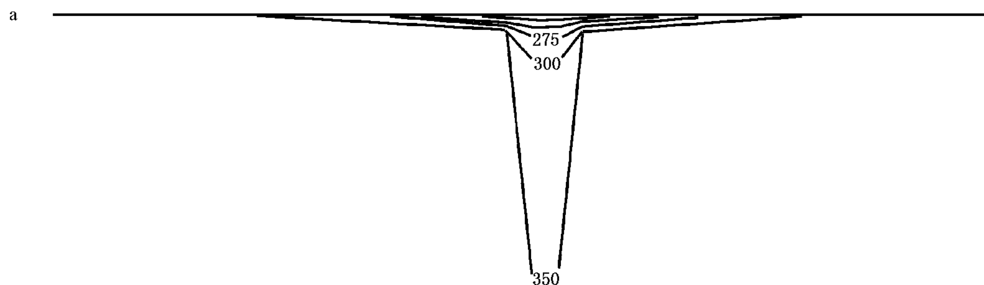
为了比较成熟度数据指标，不论简单和复杂的模式都需要其他一些地区的区域测试的模拟数据，并应对测试数据作模式校正。几乎任何模式，一般来说都能校正到与一口或几口井的成熟度数据相一致，进行过地质方面校正的模式能够预测未经校正井的成熟度的变化。例如前面提出的第四纪热复活，可能已明显改变了横切北海热流的变化，可是第四纪变化对现在埋藏的生油源岩的成熟度影响的时间有限，对从第三纪深部运移的成熟烃的分布将无影响。

维京地堑挪威海北部是目前人们具有勘探兴趣的边缘盆地。在挪威海的 Møre 和 Vøring 盆地中第四纪沉降的高速率预示了第四纪热复活已使这个地区产生了拉张，因此，该区第四纪下埋藏的潜在生油源岩比其他地区同样埋藏深度的潜在成熟度指标会更好些。

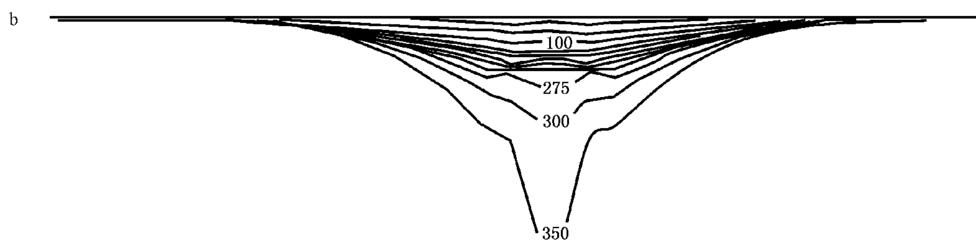
五、小结

通过对北部北海地区构造沉降和其地球物理资料的分析，查明了此区盆地沉降的面貌。从所提供的资料来看，已获得了如下一些结论。①北部北海地区，包括地壳/岩石圈拉伸过程为主控制的多期裂谷。②主要表现为构造沉降。③通过简单的具裂谷期的盆地形成拉伸模拟就能预测出三叠纪和侏罗纪中期至晚白垩世期间所观察的基底断裂拉张、地壳变薄、目前的弯曲刚度和构造沉降。④该区的构造活化看来似乎是发生在晚第三纪，大范围发生是在第四纪。⑤不同的沉降区与高热流、低弯曲刚度的联系证实了这期间的重要热复活。⑥构造活化的因素可能是由于较老构造载荷均衡，由于热作用使之再度均衡的结果。另外，第四纪构造沉降槽形的形成表明该区新的一期裂谷正在开始，类似第四纪的活化也出现在挪威的 Møre 和 Vøring 盆地中，对这期构造发展的认识，很大程度上可能影响到对此区的勘探工作。

地壳/岩石圈的拉张与弯曲



密度增大作用



活动加热

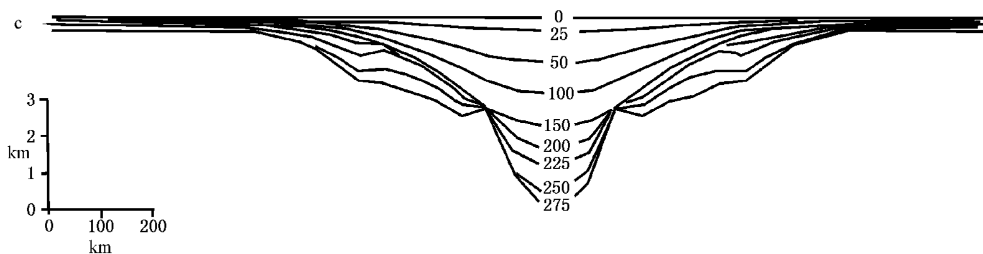


图 3－80　模拟北北海盆地的一条横剖面(相当通过中央地堑的横剖面)

a—**拉伸与挠曲**；b—**玄武岩/榴辉岩和绿色片岩/角闪岩密度增加的反映**；

c—**拉伸、挠曲、密度增加和软流圈对流引起的加热活动**。**时间以** Ma **为单位**

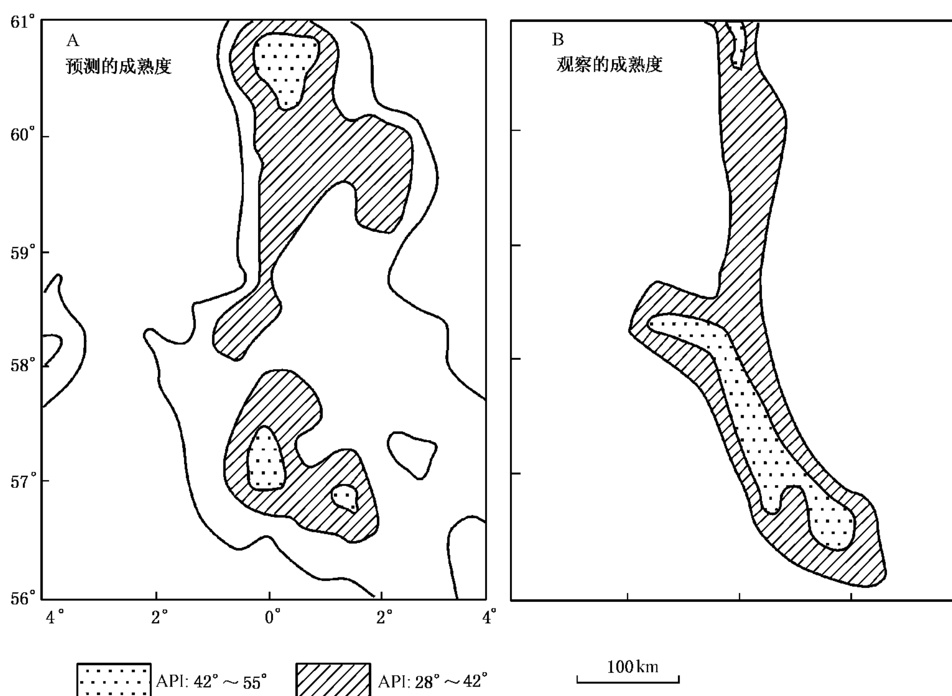


图 3－81　北北海盆地晚侏罗世地层中预测和观察的成熟度图

第四节　北部盆地主要储层的沉积成岩作用

储集岩的性质和品质是构造背景、保存条件、沉积环境和成岩作用之间复杂的相互作用的结果。因而重塑该区地层的沉积环境，不仅为区域规模的勘探，而且为油田的开发提供描述和预测储集岩的发育和分布的最佳的基本框架条件。重点放在怎样运用沉积模式，去更好地勘探和开发下列储集层：

(1)二叠系风成或河成砂岩；

(2)侏罗系河成、三角洲以及边缘海砂岩(即下侏罗统斯塔福约德组和中侏罗统布伦特群)；

(3)侏罗系浅海和深海浊流砂岩及砾岩(即上侏罗统富尔马（Fulmar)/管状尖型砂岩、布雷/马格努期型沉积)。

(4)第三系深海浊积扇沉积(即古新世和始新世砂岩)。

一、下二叠统赤底砂岩与前二叠系的储层概貌

在赤底统砂层中，可区别出下面 4 个大的沉积相。

(1)砂丘砂岩：主要储集岩，厚度大，非常纯净，孔隙度 12％～20％，渗透率(100～1300)×$10^{-3}\mu m^2$。

(2)干谷砂岩：分选差、泥质砂岩，孔隙率 10％～20％，渗透率(1.0～100)×$10^{-3}\mu m^2$。

(3)砂丘间萨布哈(盐滩)：含泥质很多，蒸发盐含量高(盐、无水石膏)，孔隙度 5％～18％，渗透率(1.0～10)×$10^{-3}\mu m^2$。

(4)**河积砂岩**:**致密、细颗粒的,带有薄页岩和泥岩,孔隙度** 2%~10%,**渗透率**(0.1~10) $\times 10^{-3} \mu m^2$。

沉积环境分析和岩相发育识别,对勘探概念的形成、试井、完井以及开发工程和经济都很重要。

储集岩中的粘土矿物一般由三分之二左右的伊利石和三分之一的高岭石、绿泥石以及少量蒙脱石组成。在主要储集层(即砂丘砂岩)内,泥质含量相当低,而地层水通常矿化度很高。

北部北海已有许多井钻遇了风成二叠系砂层,这是很重要的资料。由于资料的积累可绘制出下二叠统风成砂岩和隐伏的石炭系地层的可能分布范围。图 3—82 **是对已有资料的推断和相当乐观的预测尝试。**

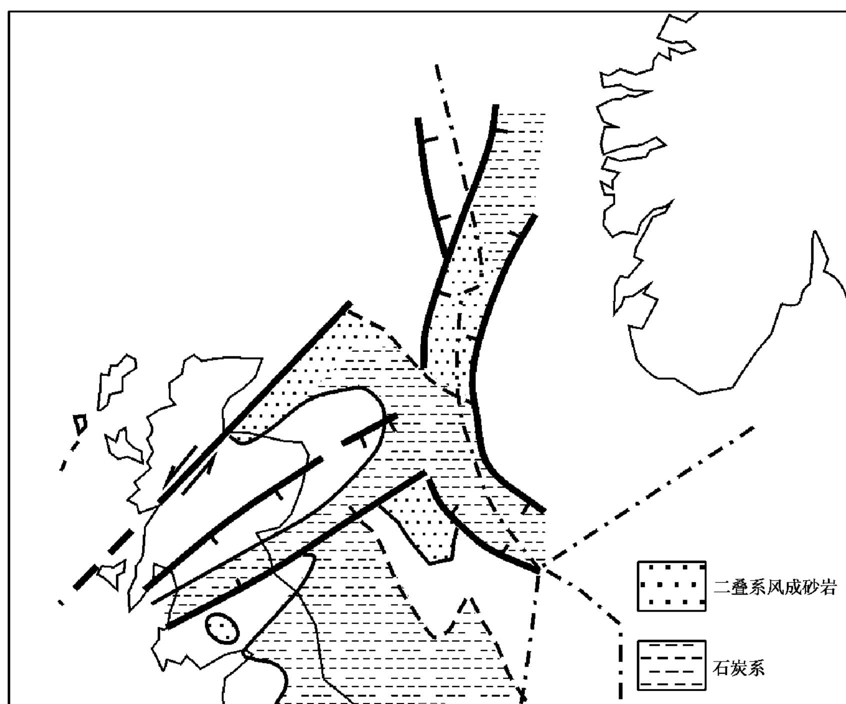


图 3—82　**北北海盆地石炭系和风成二叠系地层的可能分布**

对石炭系地层的分布已经了解得相当清楚了。认为它是从米德兰山谷向东延伸的。由于许多井在无法确定地质年代的陆相砂层中完钻,因此中央和维京地堑的界限就更加难以预测。要确定这些砂层是二叠系—三叠系的,还是泥盆系的并非易事。在默里湾盆地北部边缘可能有二叠系砂层和石炭系隐伏露头的连接点。但这个地区经历了深埋之后又产生相当大的隆起和截断,有必要建立古埋藏深度图才可确定石炭系地层的熟化程度。

石炭系地层不仅可能是生气层,而且在英国内陆它还含有石油。在北海南部钻遇了含气石炭系砂岩,而在北海北部发现了含油层,虽然有的为外来油源。但从靠近苏格兰内陆石炭系地层丰富的油页岩的水深较浅的默里湾地区可能成为石炭系地层中含油气最有希望的远景区块。

在北海北部前石炭系地层中已见到油显示分布在泥盆系到变质基岩的范围内。目前仅在巴肯(Buchan)**油田发现泥盆系地层有工业价值。此处埋深为** 2700m,**孔隙度是** 5%~15%,**大都属裂隙,并且断块经历了深埋和尔后的上升过程。**

二、三叠系的储集层发育概貌

在北海北部地区，三叠系层段被钻遇的机会比二叠系层段多。但是，已有资料仍然无法证明三叠纪地层是重要的石油勘探目标。它的全部陆相环境（具有严重氧化的粘土和粉砂，并有许多薄的和下连续的砂体，后者显示频繁的碳酸盐岩胶结作用和成岩作用引起的孔隙度降低）表明不可能有良好的储油层。在有些井中，已经发现了厚的砂岩层（500m 左右），其粘土含量较低，但是测井测得的孔隙度一般只在 13%～17%范围内，所以，虽然在三叠系地层有油显示，但是目前仅在 211/13－1 和 211/29－3 两个区块的某些钻井中发现有油、气砂岩储集层（图 3－83）。由于储集层薄而不稳定，储集性能差，因而三叠纪储集层不可能是该区的主要勘探对象。

对三叠系有关储集层的成岩作用研究成果很少，公开报导仅见于维京地堑南端菲利普公司钻的 16/29－3 井，在深约 3300m 处的 127m 井段为三叠纪的地层，作了不够系统的成岩作用叙述。通过系统岩心的层组厚度、粒度分布、颗粒成分和形状以及粘土矿物的研究显示出如下特点：

(1)以细到中粒砂岩占优势，有混合的颗粒形状及大量的不稳定的格架组分；

(2)富含云母；

(3)没有化石（包括微体化石），保存极差的植物碎片除外；

(4)缺乏页岩，但有大量碎屑；

(5)缺乏外来卵石；

(6)一般呈绿灰色，局部也有红色；

(7)向上变细层序的重复；底部有页岩碎屑，向上为交错层分选好的砂岩，接着顶部是粉砂质有时为页状的波痕标志层。

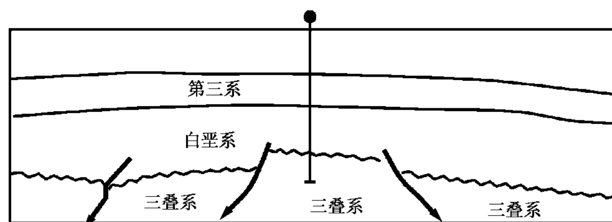
上述说明为河流环境的沉积。这个层序与曲河流有关的沉积样式是一致的，底部具交错层、分选好、含页岩碎屑的砂岩似与河道砂坝及横向增厚的点砂坝沉积物以及河床的残留砾石相当；粉砂质波痕层理的顶部偶见页岩，相当于“顶积层沉积”，可包括滩槽充填，淤积、决口扇和泛滥平原沉积。一些岩心里的顶积层沉积显示几十公分的粒级层，每层几毫米厚，底部为细砂岩，顶部为粘土；这些可以代表淤填（冲积）沉积。偶见有灰绿色页岩被解释为泛滥平原沉积。当泛滥时水流速度高，从而很少见细粒沉积。点砂坝及顶积层沉积的厚度却与泛滥时水的深度有关。

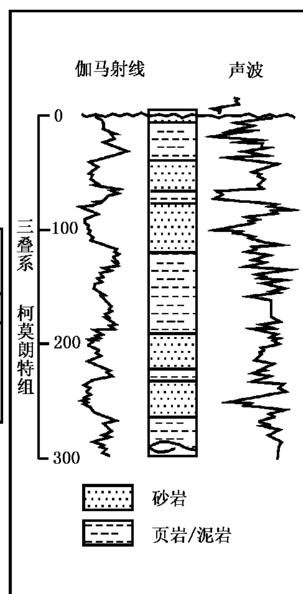
另一方面，辫状河流的沉积作用可以解释粉砂与粘土的缺乏。可是辫状河系的沉积样式与曲流河的沉积样式尽管有一些不同的特点，但是要在岩心里鉴别砂岩属辫状或是曲流河道沉积常常是不可能的，因为从辫状河过渡到曲流河道沉积是普遍存在的现象。

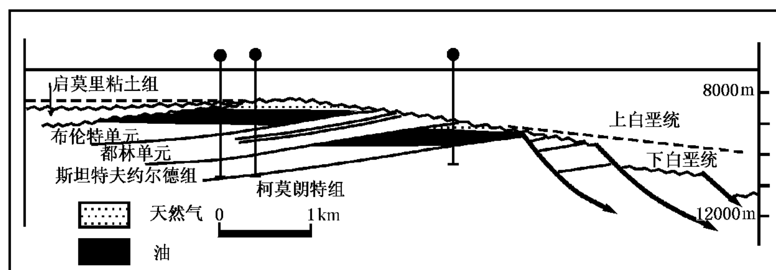
在沉积层序里，粘土矿物、白云石、次生石英和压实作用对岩心中有限的孔隙空间起重大影响。

薄片中记录的粘土平均含量为 13%，包括伊利石、自生高岭石和自生绿泥石。在分选好的河床沉积中粘土总量平均最少，在顶积层沉积物中最高，绿泥石在不列颠三叠纪砂岩中，是普通矿物。在 16/29－3 井的岩心里见到的自生粘土可能是绿泥石，是那个时代沉积中一般性的反映或局限维京地堑的特殊条件，或者由局部沉积环境决定的。

白云石胶结能出现于砂岩层序的任何部分，白云石胶结一个显著特点是其底部大部分具有突变的特征。白云石的结构从粗晶镶嵌状变为细晶菱形状，许多晶体丛生而有包体，且常为







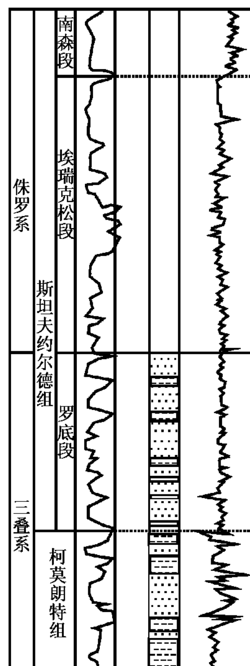


图 3—83　北北海 211/13—1 和 211—29—3 两个区块三叠系储层情况

a—211/13—1 区块发现井及横剖面；b—211/29—3 区块横剖面钻井录井图

砂颗粒大小的双重图像。残余长石及石英为白云石腐蚀是明显的，这就意味着白云石胶结先于埋藏期。白云石条带的发育显然与环境因素有关，碳酸钙碎屑可以在沉积期间富集于层序的底部，后来为富含镁的原生水供给白云石化作用的原料，并按大小及分选度而聚集起来。而发育起来的粗粒白云石胶结的大面积密集为成岩孔隙的增加带来了实际意义。

次生石英构成这些砂岩的最后胶结，普遍存在于各种石英岩中，由次生加大填满孔隙。该类砂岩中石英加大是典型的成岩矿物。在埋藏后的地层里还有石英加大的潜力，但普通趋向

于被抑制。从岩相关系可以看清楚,控制石英生长的主要因素是颗粒的自生粘土薄膜。没有白云石及粘土基质、自生粘土边缘缺失、薄或破碎都有次生石英加大,但是构成砂岩层序中部的沉积却较少的生成次生石英。

大量薄片研究显示了压实作用的证据,有时由于脆弱岩石碎屑及更耐抗压的颗粒如石英的局部破裂,而使没有显著变形的颗粒互相贯入,即所谓压溶作用。在干净的缺乏白云石或次生石英胶结的砂岩里这些作用更为显著,并且由于胶结物与基质的增加而减小。压溶作用发生于接触压力高的地方,减小了接触压力的地方就没有压溶发生。岩心样品中的孔隙充填组分——粘土(所有种类的)+白云岩+次生石英——总量的填塞密度较大时,在未曾有过胶结、干净、分选较好的砂岩,在相同埋藏条件下会发生多大的压实作用?在停止有效的压实之前孔隙度可减少约 12%。胶结与压实对渗透性能的影响会更大。如孔隙度与渗透率在分选好的河床砂岩里最高,平均为 14%和 10mD。当有自生粘土矿物存在,渗透率便显著降低,平均只有一个毫达西。加之由于大量的白云石及次生石英的存在占据了更多的孔隙空间,使岩层中孔隙度与渗透率降低更快。

三、下、中侏罗统砂岩储层的沉积成岩作用

下侏罗统斯塔福约德砂岩以及中侏罗统布伦特砂岩代表了北部北海侏罗系的主要储集层。1971 年在 211/29－1 号井(布伦特油田)发现的布伦特砂岩和后来钻井中发现的斯塔福伦特砂岩,揭示了比赤底统砂岩更为复杂,在区域上变化较大的储层系列。

布伦特砂岩表现为大规模的退覆、超覆特性(图 3－84)。根据现有资料把布伦特砂岩解释为以波浪作用居上风的三角洲和三角洲体系间的产物。它沿着裂谷体系的轴向北西方向展布。区域格架表明布伦特砂岩是在范围广阔的中启莫里阶构造幕之后海平面下降时沉积的,当时在北海中部是继续隆起和抬升,成为当时主要的物源区。沿持续沉降的维京地堑发育了该地层的沉积。

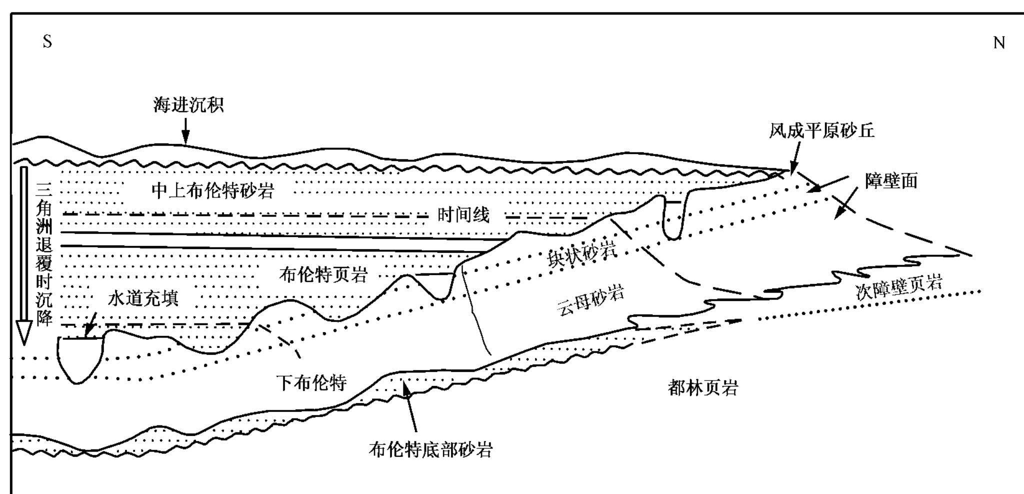


图 3－84　北部北海盆地维京地堑布伦特砂岩原始沉积格架

钻井资料为研究确定其沉积趋势提供了实际而有积极意义的资料,海岸障壁—滨岸砂岩复合体形成了板状砂■,其特征为向上由滨外泥岩和细粒的云母滨岸砂岩(Rannoch 组)转变为沉积在上滨/前滨、分流河道和滩谷环境(Etive 组)中的粗粒、分选好及不含云母的砂岩;沉

积在海岸和三角洲平原环境中的砂泥岩互层，变化较大（Ness 组）；最后为相对较薄的海侵砂■（Tarbert 组）。

斯塔福约德组代表一套大规模退覆/超覆交替的沉积。退覆地层位于储层的下部，向上砂岩含量增加，砾石大小和频度增加，砂体密度增加。超覆/海侵地层，以河道砂岩为主变为洪泛平原的页岩，再上是日益增加的低能/远岸浅海沉积，构成了布伦特油田中具重要意义的下侏罗统上部的储层单元。

斯塔福约德的开发具有特殊重要意义，尽管在经济收益上比不上布伦特群，但斯塔福约德组在布伦特油田和斯塔福约德油田都拥有大量的油气。从区域上来说，斯塔福约德组下部为一套局限于 Hutlon－Ounlin 断层带，位于东部地堑中央的河流体系。上部和横向上变为分布非常广泛的浅海砂岩（图 3－85）。

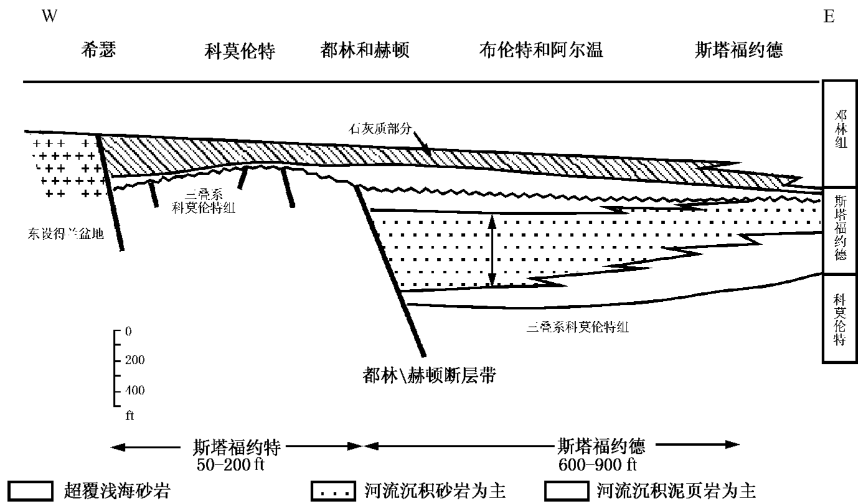


图 3－85　北维京地堑中斯塔福约德组横剖面图

注：1ft＝0.3048m

布伦特群沉积，已如前述为一套砾石、松散的充填砂、泥质砂、云母细砂、偶有细粒灰质泥，属于海相三角洲环境。它可分为 4 套地层，表 3－8 简述了每层的岩性、含盐度、沉积环境以及孔隙度与渗透率的范围。

表 3－8　布伦特群（砂岩组）简表

分　　层	岩　　性	含盐度	环　　境	孔隙度	渗透率（$\times10^{-3}\mu m^2$）
上部砂岩/页岩（TARBERT 组）	块状页岩和粉砂岩、夹砂岩和煤	微咸	三角洲平原沉积物：网状分流与泻湖区沉积物，夹分流水道砂岩	3％～23％	0.079～1732
块状砂岩层（NESS 组）	均匀砂岩，顶部为煤（1m 以上）	微咸—咸	上部属三角洲斜坡及前缘，顶部夹分流水道砂	4％～21％	0.073～79
云母砂岩层（ETIVE 组）	薄层云母页岩与粉砂岩，局部见黄铁矿，向上变粗；块状交错砂岩；含煤	微咸—咸	三角洲斜坡沉积物	9％～23％	0.28～140
底部砂岩层（RANNOCH 组）	上部页岩和粉砂岩；下部长石砂岩和微砾岩，有层内泥质碎屑	咸	前三角洲沉积物	4％～21％	0.69～20

在埋藏初期，这些粗—中粒，分选良好的砂具有较高的孔隙度，但是随着埋藏增加引起了许多成岩变化。方解石晶体的早期胶结作用阻止了石英自形晶的生长与长石的交替作用。在不存在方解石胶结的地方（在布伦特砂岩组中很少见）在石英粒接触中发生压溶作用，特别是在有粘土薄膜的地方会增强这种作用。因此被释放的氧化硅被迫转移至低压点处结晶，并具有自形菱面体，伸入孔隙，从而使孔隙开始减少。

埋藏期成岩作用也导致长石和云母的破坏，使之大部分变成自生高岭石。长石的交替作用在颗粒外部以及顺着劈理发生，而云母是沿劈理受到冲击，最后在变成高岭石时绽裂。偶尔也有长石被方解石置换的。长石和云母毁坏所形成的高岭石成长为自形假六边形和蠕虫状粒占据着孔隙空间。布伦特砂岩孔隙度的减少降低了它的含油能力，同时由于粘土纤维的增加阻碍了孔隙间流体的流通，因而减少了岩石的渗透性。

随着埋藏加深，孔隙中常沉积碳酸盐，最初为方解石、白云石或菱铁矿持续生长，随之置换石英和其他矿物，有时呈放射状的玫瑰花形晶体。偶尔也见这种碳酸盐成为不具有变嵌晶状结构的胶结物。

晚期，菱铁矿斜方体常与自生黄铁矿在一起，黄铁矿主要置换所有其他矿物以具有典型黄铁矿擦痕的立方体出现，其本身可具有白铁矿假形。还可见到一种具有次生扩大的碎屑电气石。图 3－86 概括了成岩活动大致过程，但是实际过程可能要复杂得多。对布伦特群地层的成岩史可简要说明如下：

（1）在港湾和海相三角洲环境中沉积了石英及一些长石、白云母和伊利石颗粒，以及少量的呈分散状的黑云母、绿泥石、燧石、海绿石、金红石、锆石、电气石、石榴石、钛铁矿、磁铁矿和针铁矿，其初始孔隙度至少为 32％。

（2）少量的早期变嵌晶状方解石胶结物妨碍进一步的成岩作用，腐蚀其中的石英和长石颗粒，并使孔隙度与渗透率减少至零。

（3）在无方解石沉淀处，埋藏压力作用使部分石英溶解，导致在最高压力点上石英粒的缝合接触，而在最低压力点上石英的沉积。由于次生石英的生长，形成了自形晶面，因此多少减少了孔隙度与渗透率。由于长石与白云母的破坏使孔隙空间微有增加，但是分解物的沉淀如自生高岭石与重结晶的碎屑伊利石又把许多孔隙填了起来使孔隙度与渗透率进一步减少。

（4）此后，方解石（有时还有白云石与菱铁矿）细斜方体晶族生成，它们易于腐蚀较早形成的矿物比如石英、长石和高岭石。碳酸盐胶结物常较广泛的充填剩余孔隙空间，有时呈变嵌晶状晶体。

（5）晚期作用阶段，一般在有机质存在的情况下，常有菱铁矿与自生黄铁矿伴生。有时也产生具黄铁矿假形的白铁矿。

上述几个成岩发展阶段的实际效果是显著地减少了布伦特砂岩的孔隙度与渗透率。因此，孔隙度与渗透率最初是受控于沉积或岩相，特别是粒径与矿物成分，埋藏之后，开始受控于温度压力的增加、孔隙循环水 pH 与 Eh 组成的变化和随埋藏深度产生的成岩作用。

四、上侏罗统砂岩储层的沉积成岩作用

北海中北部上侏罗统的 Humber 组（自牛津阶到波特兰阶）中有 4 个主要的相组合。

（1）浅海砂岩组合（储集层）；

（2）以低放射性为特征的浅海页岩组合（盖层）；

（3）重力/块状流动砂岩和砾岩（储集层）；

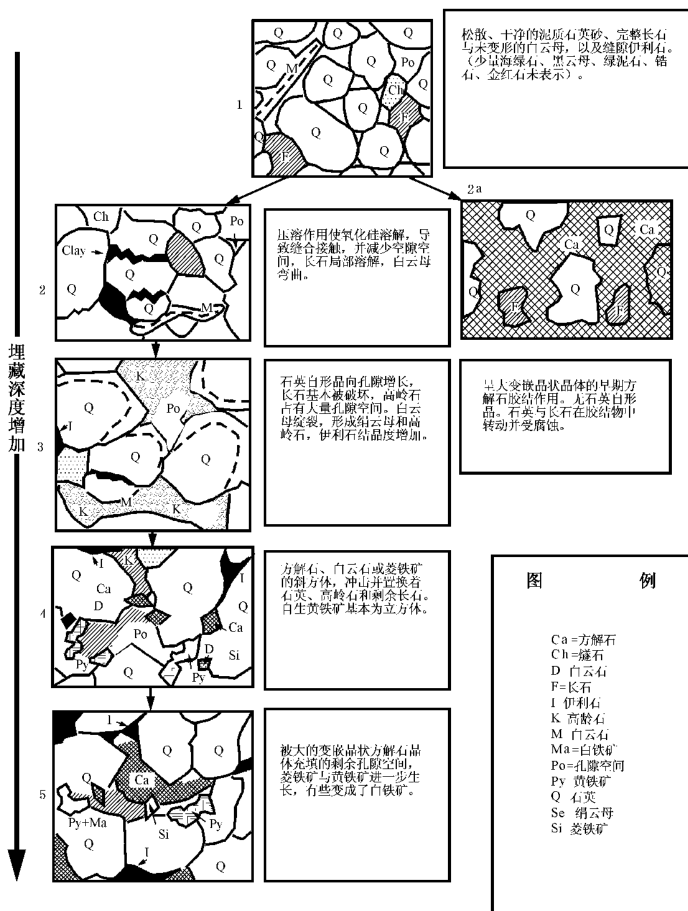


图 3—86　布伦特砂岩中不同成岩作用的影响及其与埋藏深度的关系

(4)**沉积在缺氧环境中的盆地相页岩(高放射性；r 射线值大约超过 100API；盖层/油源岩)。**

上侏罗统时期北海中北部大部分为粘土质的沉积，广泛发育有机质页岩，是该区的主要油源岩。大断层的连续活动以及半地堑的相伴发展，引起碎屑沉积的局部聚集。中央地堑的盐丘活动对沉积物也具有一定的影响，另外 Humber 组是一个全面的海侵层序，它反映了海平面的相对升高。

Humber **组中有两个主要的碎屑储集岩类型，即浅海砂岩和块状流砂岩/砾岩堆积(图 3—87)。**

块状流砂岩/砾岩层被启莫里阶泥岩所包围或是与它呈指状交插产出，而泥岩经常是作为油源岩和盖层的。浅海砂岩储集层通常也是由启莫里阶泥岩作为盖层。在这两种类型的砂体中，同生沉积构造明显地起了重要作用。浅海砂岩一般分布较局限，仅在默里湾和北海中部发育较好。块状流砂岩/砾岩广泛分布，特别是在南维京地堑南部和默里湾地区发育最好。

上侏罗统浅海相储集岩，以派普尔(默里湾地区)、富尔马(中央地堑)和乌拉(英国/挪威边界附近的挪威地区中)油田为代表。这些浅海砂岩沉积在不规则的中启莫里阶侵蚀面上。

上侏罗统浅海砂岩储集层根据其受构造影响的程度分成 2 个类型：一类是沉积物受到强烈的构造影响；另一类则具有中等强度的构造影响。

属于第一类的浅海相砂岩储集层，以富尔马砂岩为典型，该砂岩主要沉积在强烈沉降的盆地，西缘以陡倾的断层与奥克台地相连(图 3—88)。大量的岩心 X 射线照片揭示出广泛的生

系	阶	内默里湾	外默里湾	中央地堑	南维京地堑	北北海	东中央地堑（挪威）	油田
白垩系	里亚赞/贝利亚斯阶		启莫里粘土岩组	启莫里粘土岩组	启莫里粘土岩组	启莫里粘土岩组	启莫里粘土岩组	启莫里粘土岩组
上侏罗统	波特兰阶 / 伏尔加阶	赫姆斯代尔博尔德层	亨伯群 启莫里砂段	亨伯群	亨伯群	马格努斯组		马格努斯
	启莫里阶	阿尔蒂那奎那砂岩	派帕组	富尔马组	布雷组	亨伯群 希瑟组	欧拉组	布雷 派帕福尔马
	牛津阶	? ? 巴利托尔组						
		布罗拉砂质组	?	?	?		海尔大杰组	
	卡洛大阶	布罗拉泥质组						

图 3—87　北北海盆地上侏罗统同时代地层对比框架

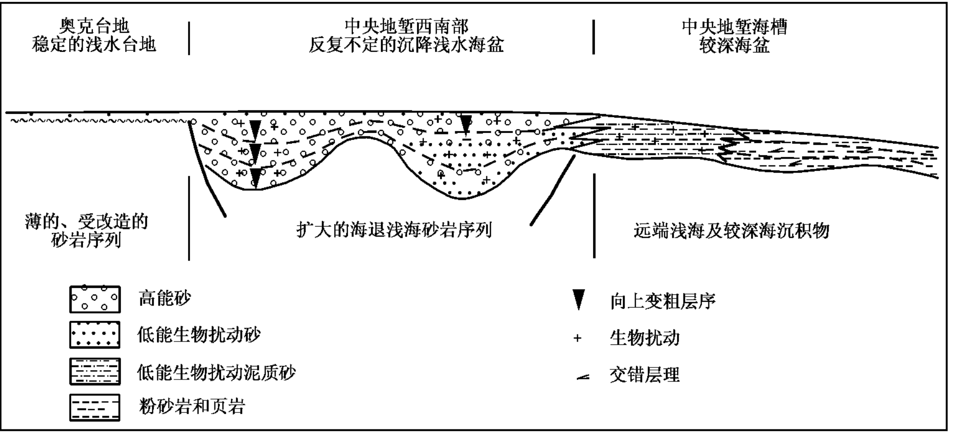


图 3—88　中央地堑南部富尔马砂岩横剖面图解

物和潜穴，偶尔也有交错层理等，表明总体是一个浅海沉积环境。形成了厚达 305m 的砂岩层，其最大特征是向上层序变粗，从泥质细砂岩到纯净的中粒砂岩。沉积和沉降之间自然巧妙的配合使得好的储集砂岩大规模聚集。从岩心中得出的沉积相层序可以最有效地进行各井间的储层对比。而测井曲线上的标志层由于通常具有成岩作用的影响，因而会使这些相对均一的砂岩发生混淆，给对比造成一些困难。

第二类浅海储集砂岩是由富含生物扰动的向上变粗的叠加层序组成。储集岩质量具更大的变化，底部是不具储集性的滨外页岩，顶部变成高能具交错层理的砂岩。在乌拉和派普尔两个油田中，该类储集岩是较厚的，沉积相侧向上变化较小而且更均一些。

五、第三纪砂岩储层沉积概貌

北海中北部地区的第三纪沉积已被证实为具有重要价值的油气储集层，并发现了一批油气田，如安德鲁、莫林（Maureen）、罗蒙德（Lomonel）、科德、奥丁（Odin）、海姆达尔（Heimdal）和巴特尔（Balder）等油田和气田（图 3—89）。

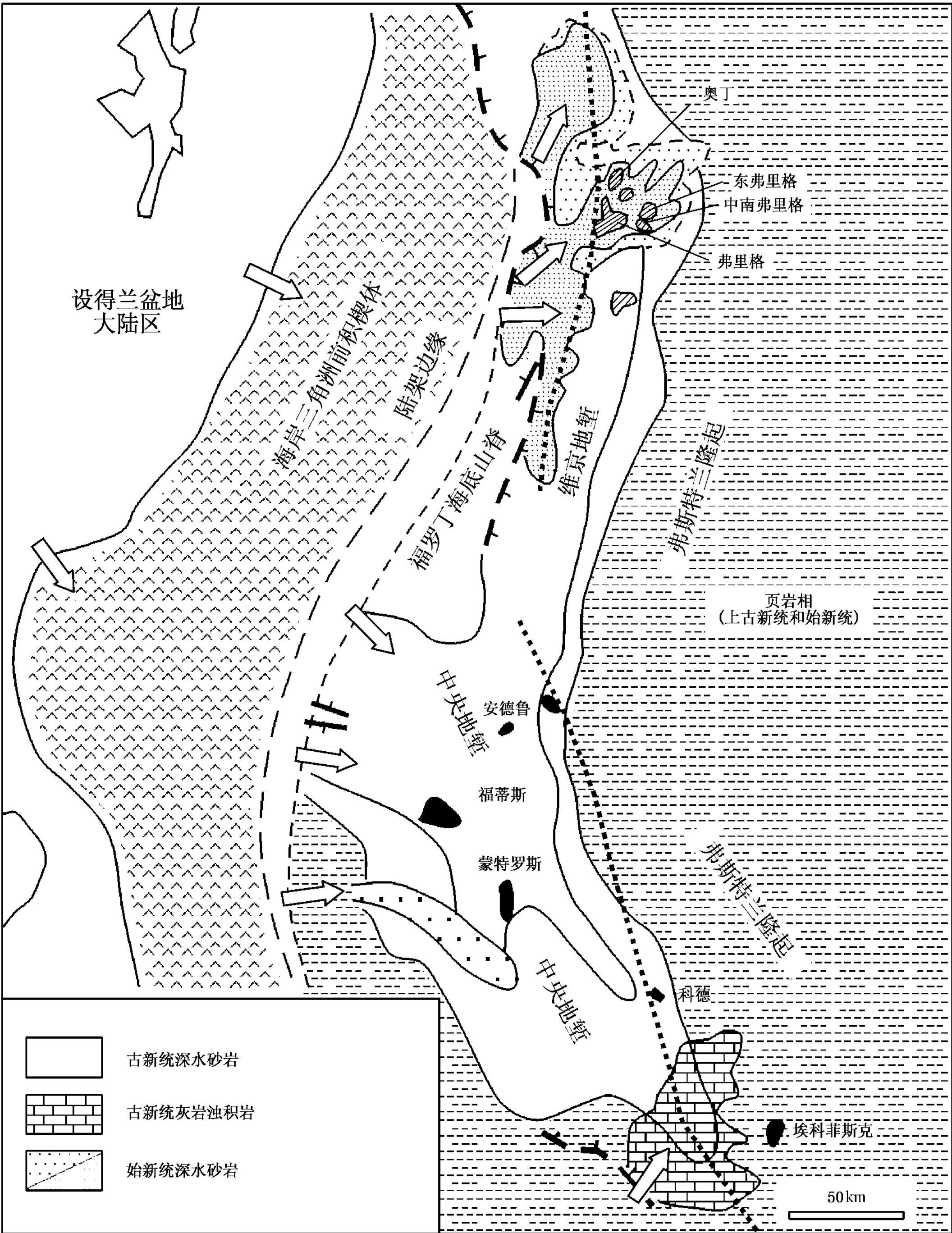


图 3—89　北北海盆地下第三系沉积相分布图

所有这些油田的砂岩储集层均是古新世和始新世一系列的水下扇复合体。这些第三系勘探层与上侏罗统砂岩储集层具有很大的相似性,均是以地层圈闭为其重要特征,具有很大的远景。

通过沉积岩石学、古生物学和地震地层学的综合,说明地震地层学研究在北部北海的区域勘探和开发中具有特殊的价值。由于新生代是相对快速的沉积阶段,沉积的砂岩和页岩厚达3500m,主要为分布在盆地边缘不连续的碎屑楔(参见图 3—89)。

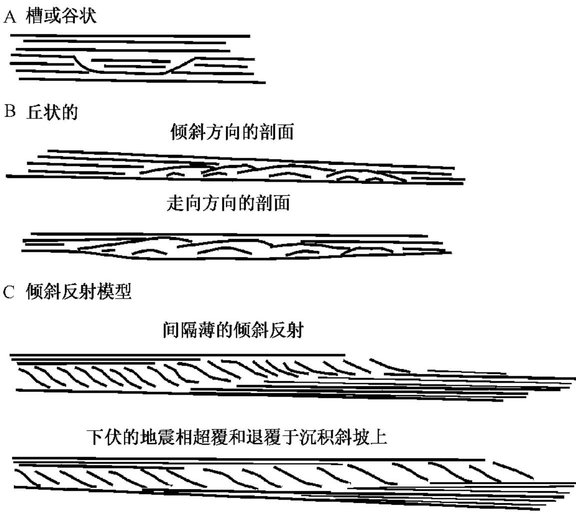


图 3—90 浊积层序的地震指示

北部北海的古新统砂岩，由于埋藏相对较浅(915～2745m)，以及具有相当高的地震分辨率，因而运用地震地层学的研究效果非常明显。古新世地震地层学研究的成果在地震记录上可清楚地鉴别地层单位的楔状几何形态和内部结构，具有大规模的顶积层、前积层和底积层反射。北部北海地区古新统砂岩，一般地震属性，是属于近积三角洲伴生的浊流层序(图 3—90)。

弗里格油田是第三系浊积扇储集岩复合体特别显著的例子，其主要扇体的几何形态从顶面构造图上清晰可见。内部地震反射的丘状或“丘状起伏”特征可从测井曲线的详细对比中显示出来，它反映包卷在水道间的扇端扇叶页岩中大量的水道/扇叶砂体(图 3—91)。在区域沉积模式格架中，只要在地震反射中，具有明显的小丘状反射，就可有把握地预测为水下扇复合体。但古新统浊积扇储集层，其分布模式复杂，导致其中油气的分布发生很大的变化，这种复杂性，代表了水下扇储集层变化的基本特征。这就需要对每个储集层进行详尽的相分析(特别是地震相的研究)，才有助于钻井开发和油气评价。

图 3—91 典型的弗里格堤的地震剖面和沉积学的解释

沉积岩石学研究对寻找和开发北海的油气资源已做出了有意义的贡献，增强了对主要碎屑储集层的成因、特性和分布的理解。特别是在恢复碎屑岩地层的沉积环境方面提供了基础格架，能对储集层的数量和质量及其在区域和油田范围内的分布情况加以描述和解释。对于由地层因素引起的圈闭，也需要一个不断发展的预测沉积模式来帮助确定地层圈闭。此外，对储层特性（岩性学、矿物学、成岩作用等）、厚度和质量（孔隙度—渗透率）等方面的预测评价，都离不开对储集层特性进行准确的地质描述，达到全面理解其形成的沉积环境。

总之，沉积岩石学在油气勘探与开发的多学科研究中将继续发挥重要作用，这一点在北部北海油气勘探实践中，已得到充分证明。

第四章　北北海盆地油源岩

北北海盆地及其邻区，寒武纪一直到近代的碎屑岩和碳酸盐岩沉积均有发育，在这些地层中存在着丰富的油源岩，特别是侏罗纪—早白垩世的沉积中，油源岩最好(详见图 4－1)。启莫里阶粘土层为北北海地区中最主要的油源岩。并已为越来越多的勘探成果所证明。油源岩

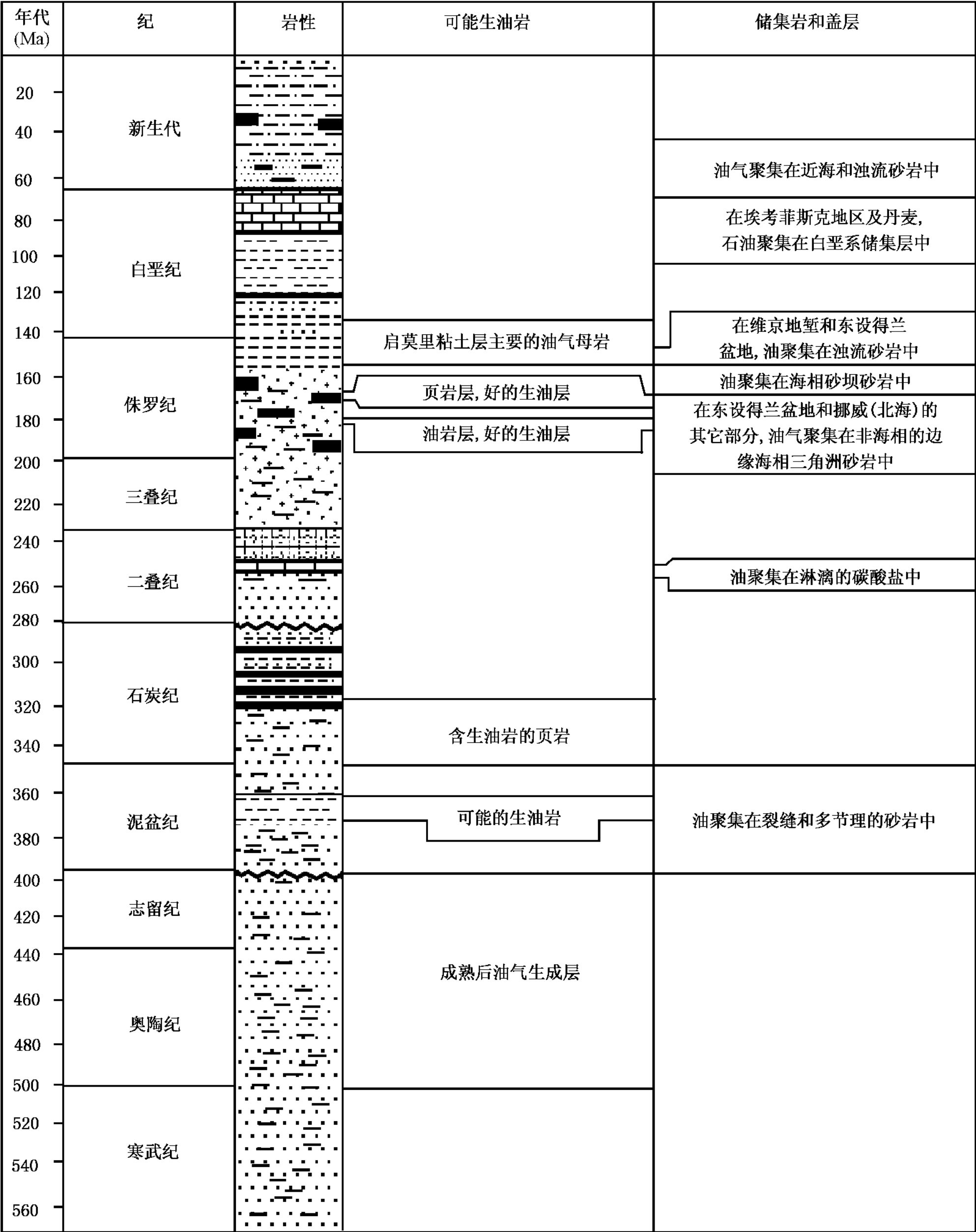


图 4－1　北海中部和北部生油岩地层柱状图

的好坏直接关系到油气的生成，下面分3个方面的内容加以讨论：①简要地叙述油(气)源岩的一般特征以及石油在母岩中的生成和运移；②对该区及其周围地区已知的油源岩进行预测和油源岩的地层学归类；③总结该区已知储集层中烃类的特征。

根据已有资料对上述三个方面内容，做尽可能详细的报导。涉及地化内容的，也穿插其中叙述。

什么叫油源岩呢？现在(或者过去)能够生成可运移的石油或者天然气的沉积物即为油源岩。石油或天然气是否足以形成工业性的聚集，主要决定于以下4个因素：①油源岩的体积和丰度；②油源岩成熟度；③油源岩形成环境的地质格局；④当前勘探的经济技术条件。

关于烃类的无机成因问题，在此不拟论及，因该区所取得的科学依据都表明，石油和天然气都是由沉积物中保留和埋藏下来的生物遗体所形成的。

第一节　油源岩的鉴别和生油量的估算

在碎屑沉积环境中，典型的油源岩(或称烃源岩)是一种富含有机质、暗绿灰色至黑色的纹层状泥岩或页岩。油源岩中的有机质在埋藏过程中经受了增温作用分解为沥青和天然气，这个过程叫做熟化。熟化作用导致了石油和天然气的生成。因此，勘探工作者在确定某个盆地或某个远景地区的生烃能力时，除用生油或生气的干酪根数量表示外，现在越来越多的使用烃源岩的体积和排泄性能等参数了。图4—2对烃源岩排泄性能的概念作了概括。

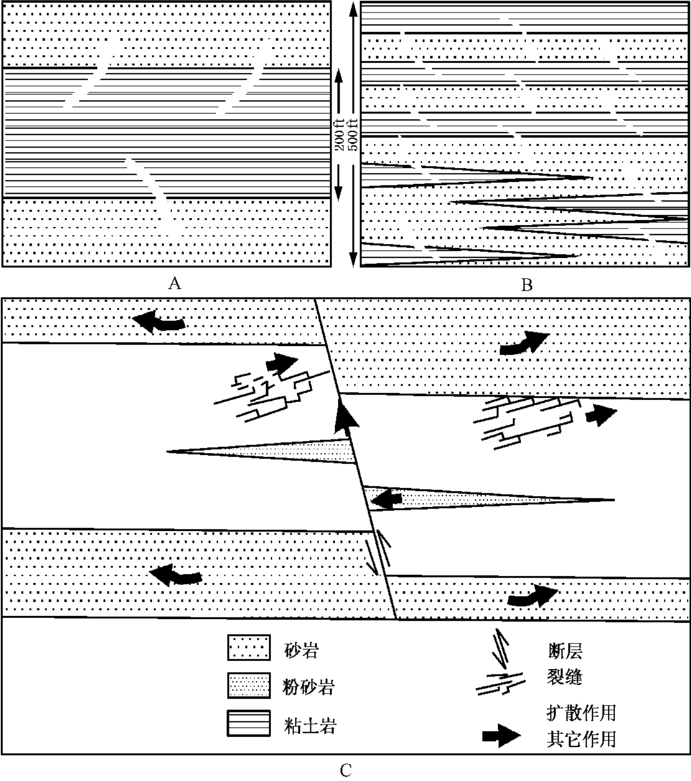


图4—2　母岩的运移模式

A—厚度为250ft，运移差的母岩；B—厚度为250ft，呈间互层的母岩，运移良好；C—与天然气运移有关的母岩和运载岩的各种接触面

为了确定烃源岩的生烃能力,需要对烃源岩的下述一些特征作准确的鉴定:

(1)有机质数量(TOC,即总有机碳);

(2)有机质类型(生油的或生气的或者惰性的);

(3)单层厚度;

(4)面积大小和横向变化;

(5)砂岩夹层数或者粉砂岩(有排泄性的)夹层数;

(6)成熟区的边界。

上述6个问题,下面将进一步作详细的阐述。

在地质剖面中,富含有机质的页岩通常是不多的,因为沉积这种页岩,需要有生物产量大和保存率高这两个并存的条件。近代研究表明,起控制作用的因素是保存率。图4—3概略地总结了有利于富含有机质沉积物沉积的各种环境。沉积速率高,水体中氧浓度低,有助于有机质保存量的增多。

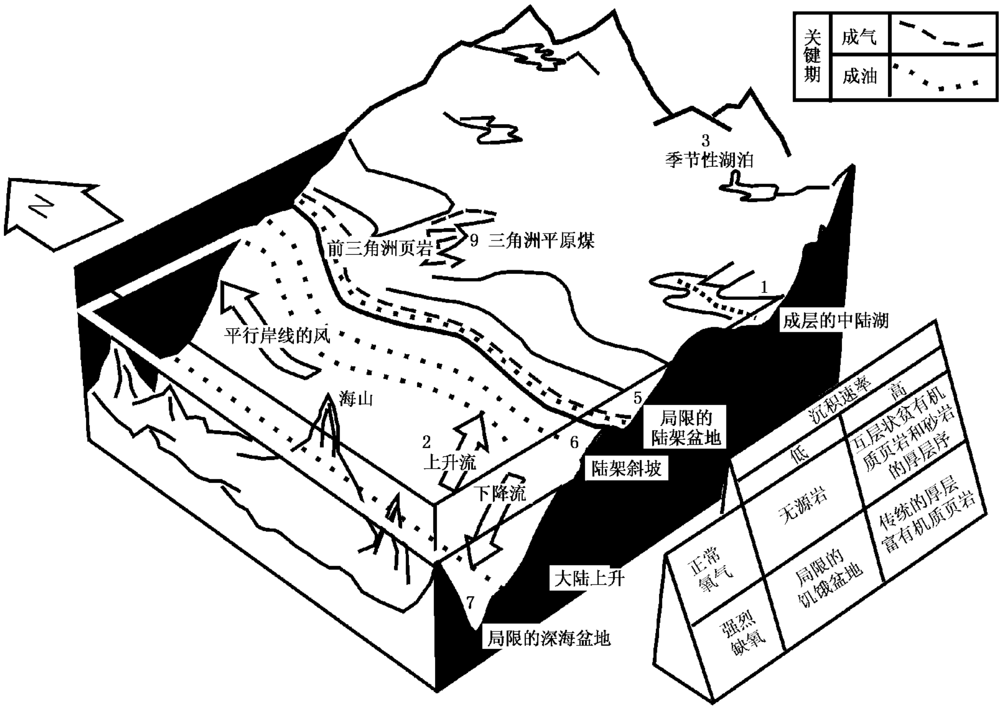


图4—3 被动大陆边缘碎屑沉积区中,有利于富含有机质的油、气母岩形成的各种沉积环境的概貌图。应指出的是,北海(维斯特法阶和中侏罗统煤系)的生气母岩属于三角洲平原环境,而上侏罗统启莫里阶粘土岩组的黑色生油页岩,则属于闭塞陆棚—盆地环境

1—有时是大洋裂谷作用的初期阶段,例如南大西洋白垩系黑色页岩,现代的东非裂谷;2—各个大陆的两侧;3—泥盆系,例如苏格兰的奥卡地安盆地;4—二叠系含磷组,或美国的始新统绿河页岩,欧洲的含铜页岩;5—例如北海的上侏罗统;6—例如西北非边缘中新统;7—例如卡里亚科海沟;8—例如密西西比/墨西哥海岸,远东的第三纪三角洲;9—例如南北海的上石岩统

沉积物中的有机质大致有3个来源:①高等(陆生)植物(树木、蕨类等);②低等(水生)植物(浮游藻类等);③细菌。从数量来看,动物组织只少量形成了干酪根。带入沉积物中的陆生植物,如果未经蚀变,都成了镜质体,即生气的Ⅲ型干酪根。当镜质体生成非炼焦煤时(例如经氧化变为木煤),则称之为隋质体,即Ⅳ型干酪根。但是,陆生植物的孢子花粉、树脂或角质层

等，在沉积物中达到很高的富集度，则可生成石油或特有的凝析油。这类陆生植物组织总称之为壳质体，壳质体属Ⅱ型干酪根。富含藻类或细菌类的沉积物，被埋藏后能生成石油，以及生成与石油伴生的凝析油和天然气，这类物质称为类脂质干酪根。类脂质干酪根属Ⅰ型或Ⅱ型干酪根的范畴。

表 4－1 和图 4－4、图 4－5 总结了上述几个术语的定义和应用。下面就用这些概念来更加详细地讨论烃源岩的各种特性。

表 4－1　利用几种不同的分析方法来识别成油干酪根或者成气干酪根

成烃的潜能	有机岩相学			热解[1]（岩石热解分析）	δ ^{13}C (PDB)	H/C[2] 原子数	成因（不是沉积环境的成因）
成油（凝析油或气）	脂质体	藻类的或非晶质（腐泥）	非晶质型	Ⅰ型	＜-28（淡水藻类 -28～-32）	1.5～2.0	水生（淡水或海水）藻类，往往经细菌降解为非晶质物质。陆源孢粉、角质层或树脂，也可以发生降解。
成凝析油	壳质体		斑点状型	Ⅱ型		1.0～1.5	
成气	镜质体	草本植物的	透明型	Ⅲ型	＞-28	0.5～1.0	陆源木质—纤维质组织以一种非晶质或细分散颗粒保存，相对来说未经受蚀变。
		木质的					
惰性物质（非炼焦炭）	惰质体	碳质的	暗色型	Ⅳ型（$Ⅲ_B$型）		＜0.5	类似于上面的陆源物质，但在搬运过程中或森林火灾中或在土壤中经氧化作用后，发生了变化。

注：（1）岩石热解分析是对岩石整体进行热解的方法，求得的是如图4-5所定义的氢氧指数的数值。Ⅱ型干酪根往往与是Ⅰ型和Ⅲ型干酪根的混合物。

一、有机质的数量和类型

生成油或气的沉积物，其必要的先决条件是要有充足的有机质数量。形成烃源岩所需有机质数量的多少，历来都是有争论的（这和所有试图用单一变量来确定一个多参数系统是一样的）。

有机质数量的多少不能用来阐述生烃潜力的大小。因为生烃潜能的大小是要由干酪根的类型来定的。对烃源岩沉积物中有机质数量进行估价的同时，还必须用运移性能来估价。图 4－6 列出的是世界范围内总有机碳的汇编资料。该图表明寒武纪—奥陶纪以及早石炭世的沉积物中总有机碳的含量高。自侏罗纪以后，总有机碳含量又增高。粘土岩总有机碳含量比砂岩或碳酸盐岩要高。从样品的粒度分组来看，总有机碳含量随粒度减小而增加。深海钻探计划分析了 7253 块无勘探价值的样品的总有机碳含量，结果表明都很低，就更充分地说明了总有机碳含量高低与含油气紧密相关。

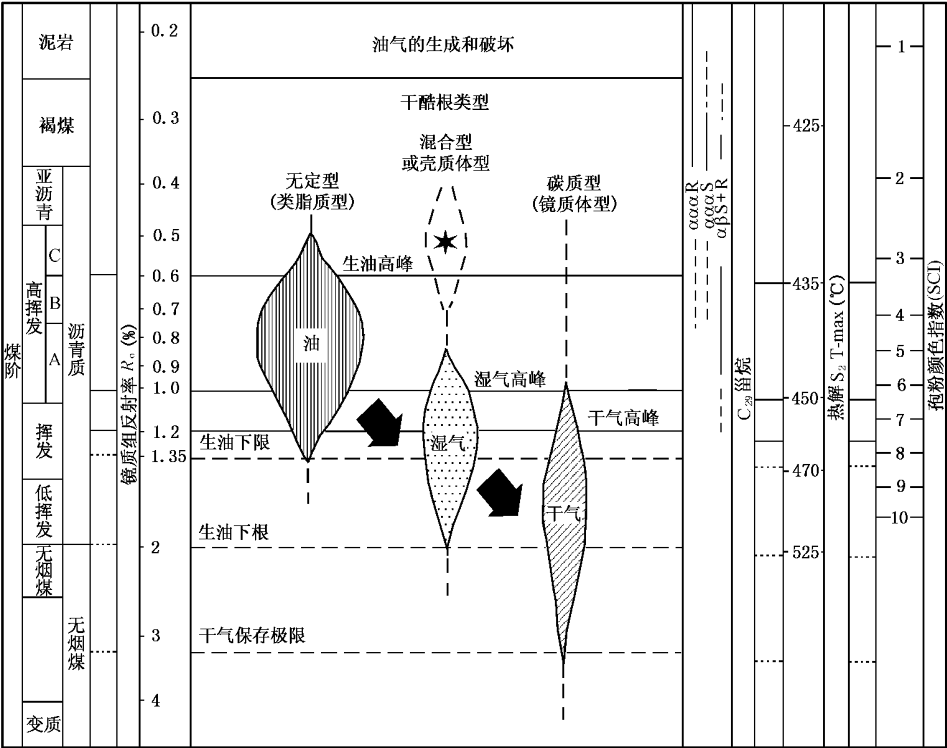


图 4—4　不同类型干酪根生成油、气的理论关系

（据 Dow 和 O'Connor，1982）

油气勘探中，对沉积物中的有机质可按 Ganl 的分法分为 3 类：

(1)成油组分；

(2)成气组分；

(3)惰性组分(或非炼焦炭)。

一般岩石中所含干酪根都为这 3 种组分的混合物。要估计某种沉积物的石油潜能，则只应考虑能生油的那部分组分的有机碳含量。按比例来计算干酪根生油或生气的能力时，应注意，生油干酪根(或已储集的石油本身)在埋藏颇深、受到相当的热力作用时，会裂解生成湿气和干气。图 4—4 总结了各大类干酪根的生油、生气情况。

干酪根类型一般是通过显微镜法(有机岩相学)来确定，或者通过热解(例如岩石热解测定)，或者通过元素(C，H，O)分析来确定。稳定碳同位素($\delta^{13}C$)、轻烃或者沉积物抽提分析等都可以提供可靠的分类依据。由于现今尚未有那一种方法完全可靠，所以一般采用几种方法来相互补充、综合解释(表 4—1)。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ类干酪根的区分是由岩石热解的氢指数和氧指数来确定的(图 4—5)。

由于热解是测定总量，所以“Ⅱ型”干酪根可能是(实际上一般总是)受细菌降解的Ⅰ型藻类干酪根和陆源Ⅲ型干酪根的混合物，纯的Ⅱ型干酪根则为孢子、花粉、角质层等构成。

当富含有机质的岩石深埋地下，可通过钻井取得岩心进行分析测试，也往往用标准序列电测井来判别。Meyer 和 Nederlof(1984)曾经利用北海的测井资料，讨论了通过伽马射线、声波、密度和电阻等测井曲线的统计分析来鉴别烃源岩的问题。北海富含有机质的启莫里阶粘土岩地层之所以称为“热页岩”，就是因该层段天然放射性很高之故。烃源岩层段的物理特性，

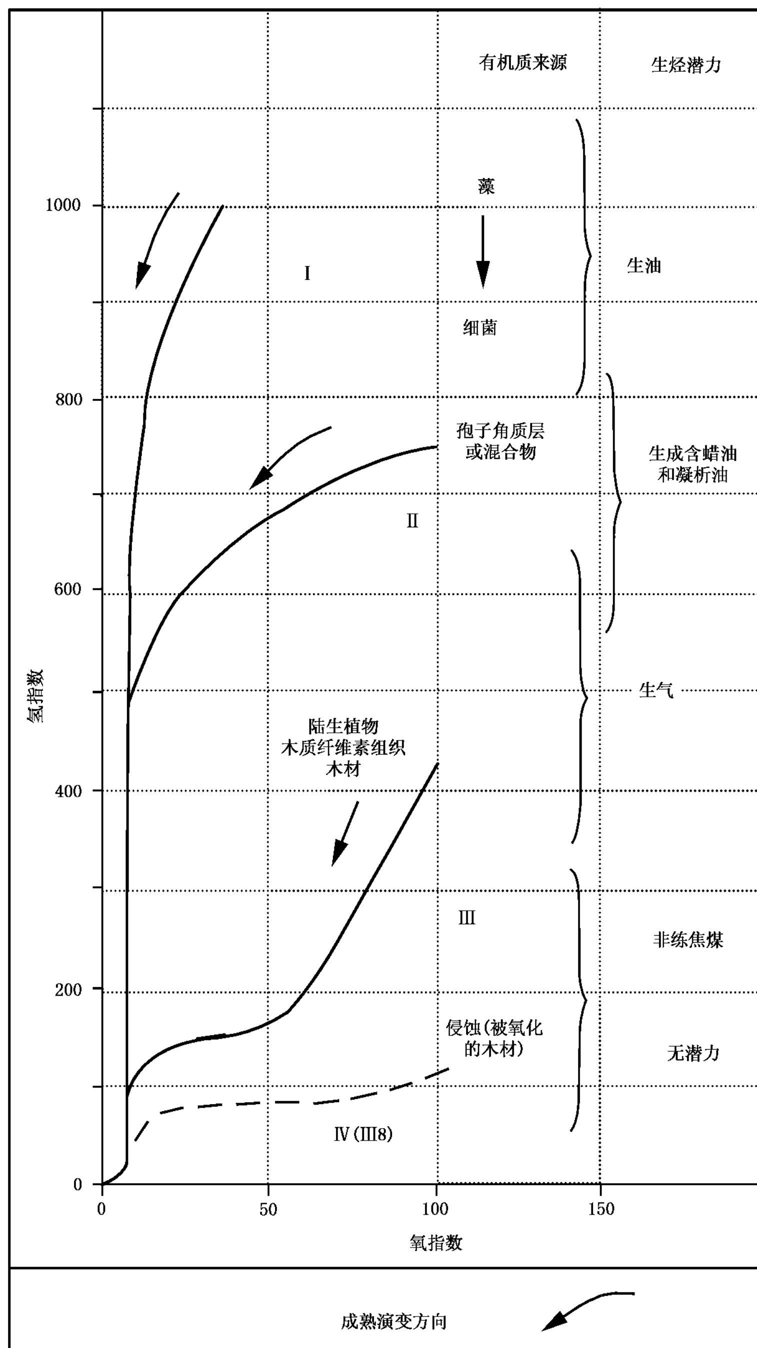


图 4－5　岩石热解分析的氧指数/氢指数确定Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型干酪根的关系图

大都可通过其测井特性曲线表示出来,这可参考表 4－2。由于测井曲线能在整个岩层剖面上对烃源岩属性作连续的监控,所以特别适用于研究烃源岩的体积分布。图 4－7 列出的是北北海白垩系和侏罗系的一套岩层的代表性测井曲线。

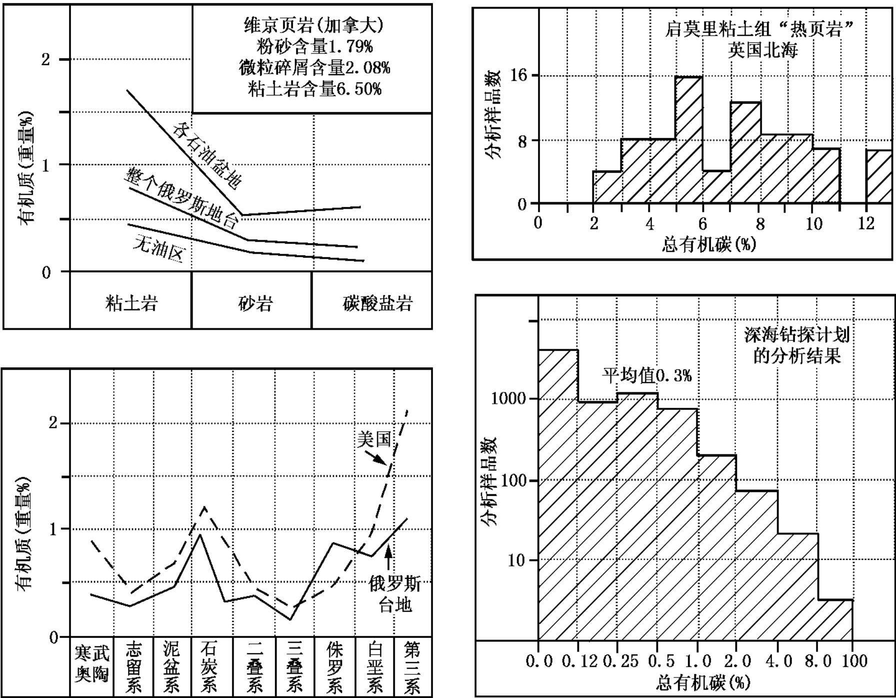


图 4—6　沉积物中有机质和总有机碳含量的世界性汇编资料图

图中表示了有机质和总有机碳随岩性样品中粒度的变化，以及随不同地层、层段的变化情况，直方图还表示了英国北海地区的启莫里阶粘土岩组的 7253 个样品资料

表 4—2　源岩的测井曲线特征

测井曲线	特征值		启莫里阶粘土岩组的测定值	说　　明
	有机质增多后的变化	煤层		
中子伽马射线/API	一般都很高	除富铀的煤层外都低	一般为 100～200	其特征主要是浮游生物的含铀反映，曲线较低段为河成页岩，很低段则为富含有机质的湖相页岩
岩层密度/g/cc	降低	很低	一般为 2.2～2.3	黄铁矿含量高时，可以引起高的密度差
电阻/Ω·m	升高	很高	未成熟源岩<5 成熟的源岩>20 成熟晚期<20	未成熟页岩，其孔隙盐水，导致电阻率低；成熟阶段由于孔隙充填了石油，所以电阻率高。成熟晚期由于孔隙水含量增加，以及有机质的石墨化，所以电阻率低
中子时差速度/μs/ft	升高	很高	不稳定	增埋增大，声波时差速度增大；井孔条件和黄铁矿含量的影响不大
脉冲中子(碳/氧)				测井新法，有可能判别源岩的丰度，如果经校正，甚至判别源岩的干酪根类型

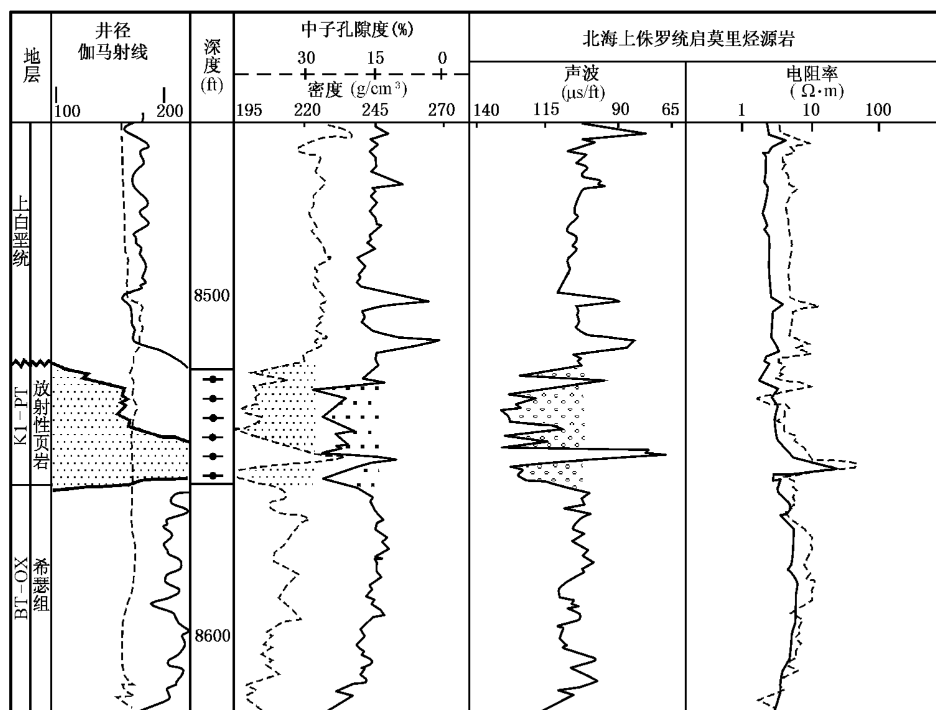


图 4—7　北海启莫里阶粘土岩组母岩的测井曲线特征图

二、生成作用和成熟作用

干酪根是在埋藏过程中成熟的，随着埋深加大，温度的上升，使得干酪根产生物理和化学变化的结果。变化之一是烃类的生成，首先生成液体（油），然后是气（图 4—4）。北海启莫里阶粘土岩层段中的生油干酪根（Ⅱ型）生成烃类的数量关系表示在图 4—8 中。

煤和碳质页岩经变质作用生成的干气（甲烷）列于图 4—9 中，其成熟度是按镜质组反射率和煤阶来测定的。

用以测定干酪根成熟度的实验参数有好几种，一般用镜质组反射率和煤的各种特性值。还可采用孢子或干酪根的颜色，荧光性（用得不多），以及岩石热解分析的最高热解温度（T_{max}）和分子比，例如甾烷/三萜烷异构体比等。各种方法的测定结果不能简单的对等。镜质组反射率是目前用得最多的方法，分子比是发展较快的方法，它的最大好处是既可对母岩测定，又可对储集层原油作测定，从而找出它们成因上的直接联系。上述测定值的优点是，直接反映了油母物质内的成熟度变化，而用不着对生成过程进行经验校正。

从烃源岩（或称母岩）在埋藏过程中经历的最高温度可以预测其近似成熟度。图 4—10 北北海各地堑型连续下降的盆地中，所经历的最高温度与埋藏深度和地区地温梯度（℃/km 或℉/100ft）比的关系。

但是，母岩经受某一特定温度作用的时间长短，对成熟度参数起着主要的影响。即镜质组反射率的大小主要取决于时间因素，孢子的颜色变化和某些常见的异构体的比值，则极少受影响。时间因素对石油实际生成体积的影响，看来二者的关系不大。因而从沉降曲线和各种地温梯度来定量地预测成熟度，是一件复杂的事情。

在埋藏过程中，沉积物中的干酪根随着温度的增加而变化，当温度达到 70～80℃时，有成

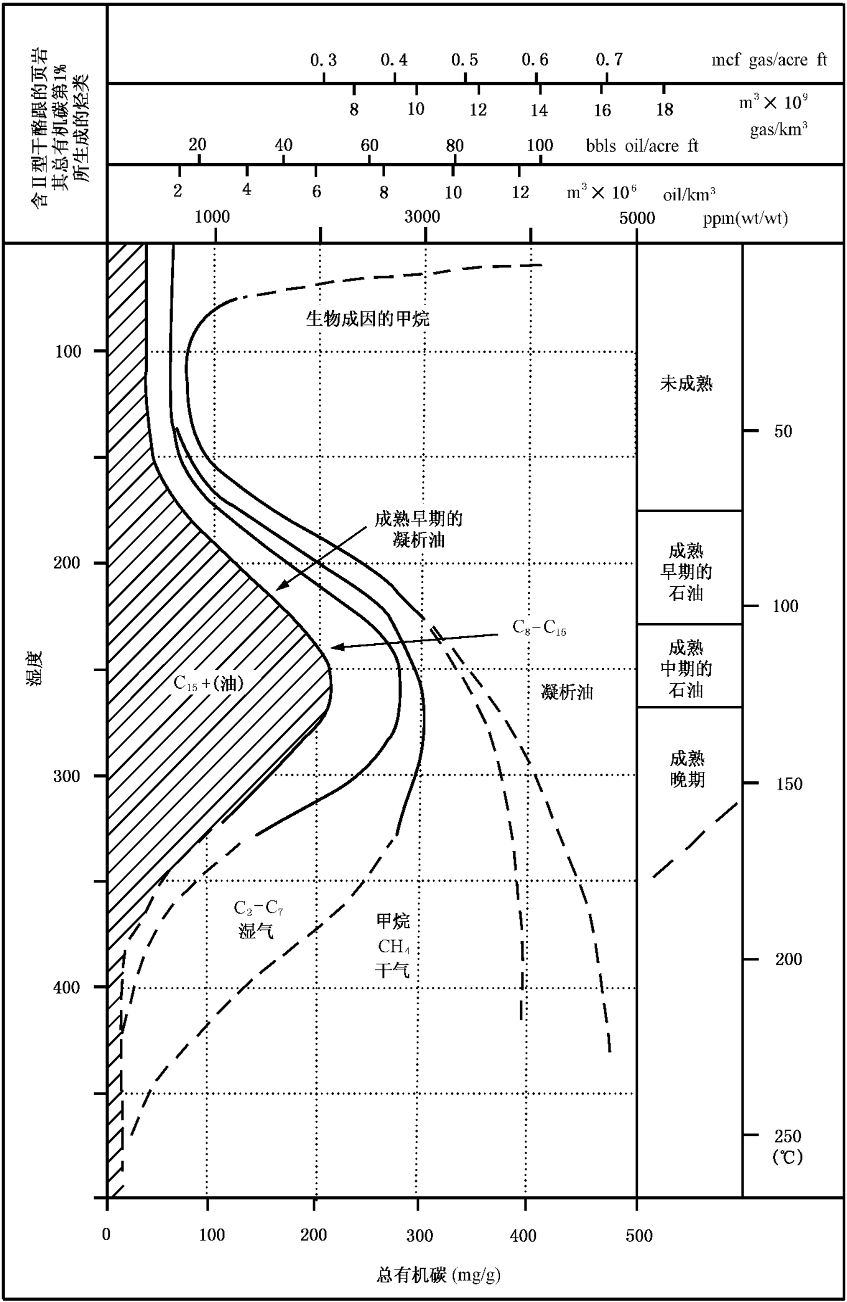


图 4-8　石油和凝析油的生成量

熟的产物—烃类生成。生成的石油，随着温度的增加，其密度逐渐变轻。当温度升至 150～175℃时，生成的烃类变为凝析油和湿气，但在Ⅳ型干酪根在相同的温度范围内温度高于150℃时，往往演化率最大。每种类型干酪根在成熟过程中的变化，可用元素分析和热解资料进行计算。

生油岩体积估算的方法已有很多学者作过讨论，简便的估算方法应包括下述几个步骤：

(1)确定烃源岩的面积和厚度；

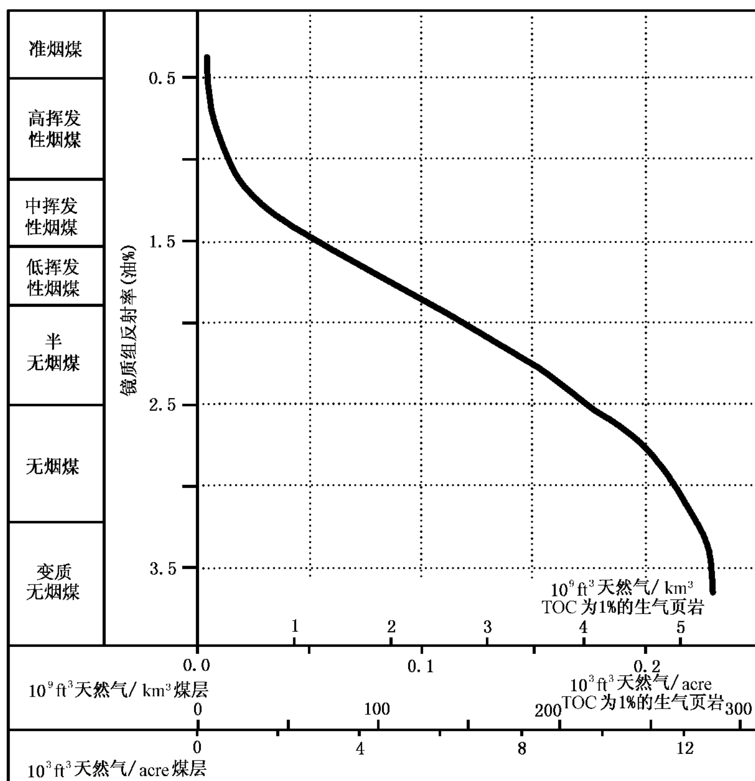


图4－9　总有机碳为1%的生气页岩

(2)圈定在圈闭(或封闭)形成之后烃源岩已成熟能排烃部分的面积;

(3)确定烃源岩单位体积生烃量;

(4)估算:烃源岩的排驱效率;运移通道进入圈闭的效果;圈闭之上遮挡效率。

以下的论述(概括于图4－11中)提供了一些最重要的观点。

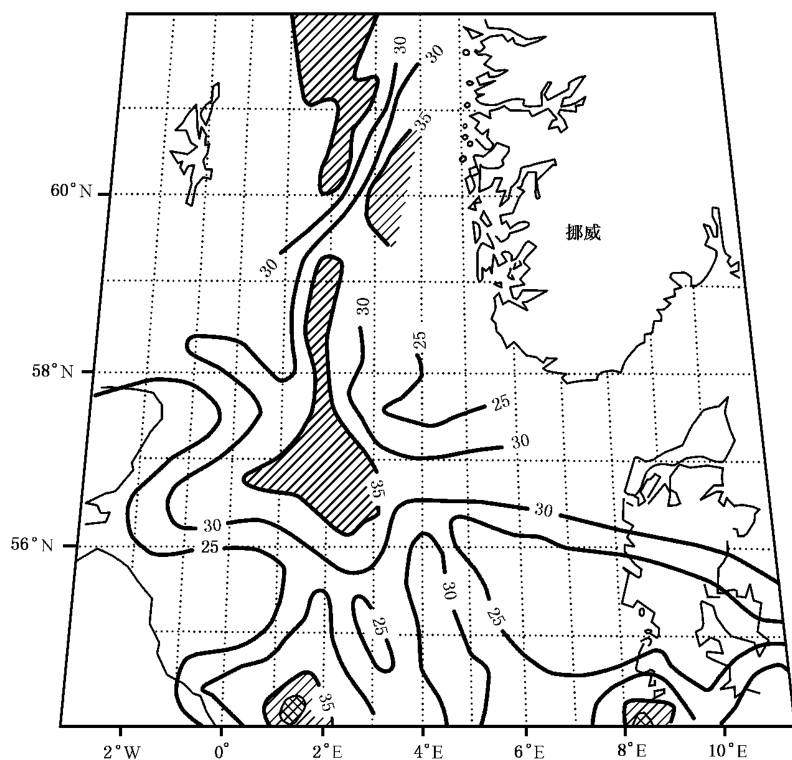
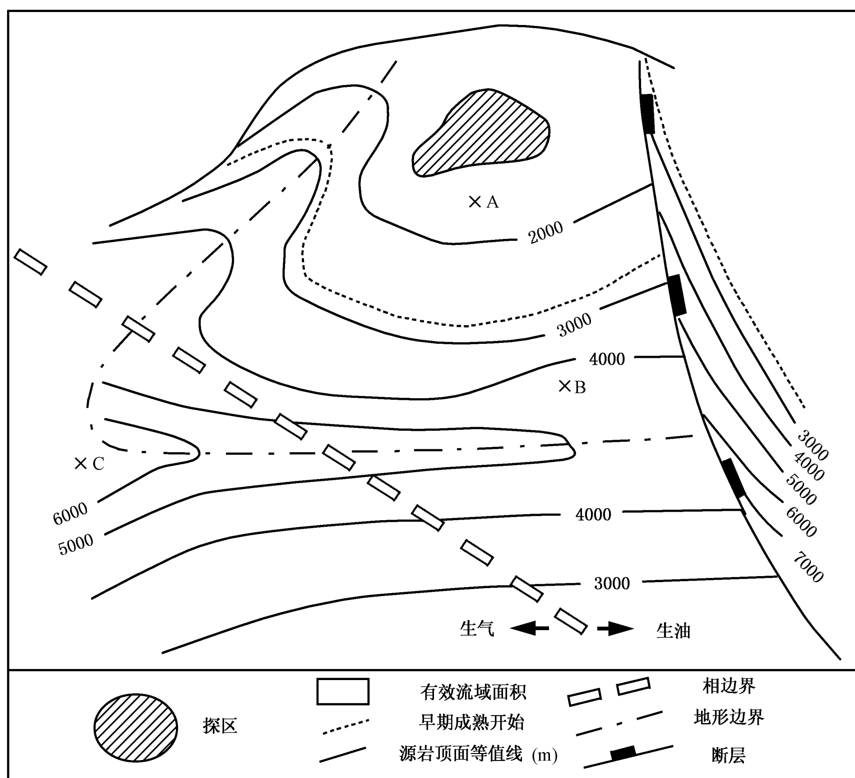
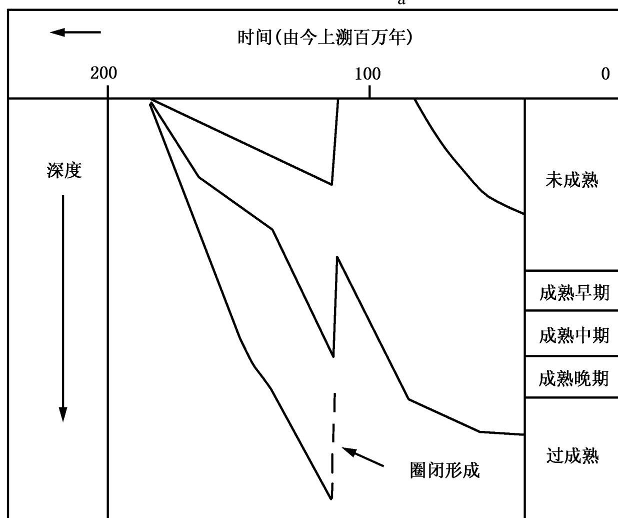


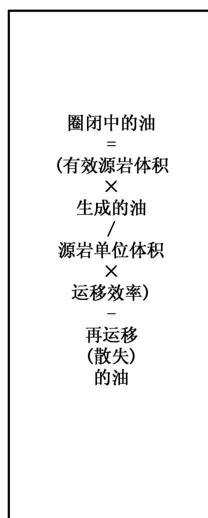
图 4－10　北北海盆地地温梯度图(单位:℃/km)


A
B
C
2000
3000
4000
5000
6000
7000
生气
生油
有效流域面积
相边界
探区
早期成熟开始
地形边界
源岩顶面等值线 (m)
断层

a


时间(由今上溯百万年)
200
100
0
深度
未成熟
成熟早期
成熟中期
成熟晚期
过成熟
圈闭形成

b


圈闭中的油
=
(有效源岩体积
×
生成的油
/
源岩单位体积
×
运移效率)
-
再运移
(散失)
的油

c

一个构造的有效排驱面积可用下述的一个特征或所有的特征来圈定(图4—11)。

(1)未成熟区和成熟早期区的分界限,或者成熟早期地区和成熟中期的界限;在上述两界限之外,不会有烃类生成的。

(2)已知烃源岩单位体积的总有机碳含量的平均值,就可从图4—8和图4—9求得源岩单位体积生成烃类的体积。如果干酪根的类型或质量在横向或垂向上有变化,这样应分段计算其生烃量。

目前对烃源岩的研究,已进入对其主要的物理和化学作用过程作三维模拟。这类大型的计算机模拟成了能精确地预测哪里有热力学模型的石油生成,那里有压力模型的石油运移。但是这类模拟需要输入大量的信息。这类大型定量模型迫使勘探工作者把石油生成和聚集作为统一的过程来对待;这将有助于对了解不多的但已达到烃类生成临界条件的一些地区的评价和认识的深入。

第二节　烃源岩的地层分布

对北部北海地层显生界富有机质沉积物的地层研究表明,启莫里阶粘土岩组(上侏罗统/下白垩统底部)是所有母岩中最重要的油源岩,而石炭系煤层(威斯特伐利亚阶)和地区性的中侏罗统煤层是本区干气的优质母岩,现将该区烃源岩的分布作尽可能的详述(参见图4—12)。

一、寒武系—奥陶系

在古大西洋各陆棚和盆地中,都找到了寒武系—奥陶系的黑色页岩。处于这个地区中的北部北海及其周边地区,在苏格兰南部高地和斯堪的纳维亚都有寒武系—奥陶系黑色页岩出露,而且还可出油和生气。瑞典南部的明矾页岩含有机碳总量达17.5%,是生油岩(热解分析油产量为4%～8%,可作为油页岩)。这些露头,至少有部分正处于生油窗。

在苏格兰南部高地的奥陶系黑色页岩,于哈特菲尔和多布峡谷一带,已处于油气生成的成熟晚期(笔石反射率平均值分别为4.45%,3.27%和2.20%)。由此往西,成熟度有降低之势。

现今尚无证据表明寒武系—奥陶系烃源岩生成了多少北海的烃类,但是,大家都知道,西起北美阿帕拉契亚山周围,东至爱沙尼亚,这些黑色页岩都具有生烃能力。

二、泥盆系

苏格兰东北的奥卡丁盆地和设得兰群岛,都有泥盆纪的富有机质沉积物。这类湖相页岩的层序厚达18000ft(5486.4m),岩性变化不大,页岩中往往出现有油斑、沥青和油苗,Hall和Douglas(1983)从5个泥盆系样品中测得其总有机碳为0.6%～5.2%。干酪根的类型不好确定。看来是生油的到生气的类型都有。据Hall和Douglas作出的甾烷和三萜烷的分布图来估算,大概是处在生油窗内。

苏格兰东部和奥克尼群岛起直至挪威西海岸以外的霍涅朗盆地,都属奥卡丁盆地的范围。这套湖相油页岩在北海北部水下延展的范围,现在还不清楚。

三、石炭系

在苏格兰中央谷地和内陆东部的陆上各小油田,一般认为是石炭系中局部富含脂质体的沉积物提供的油源。

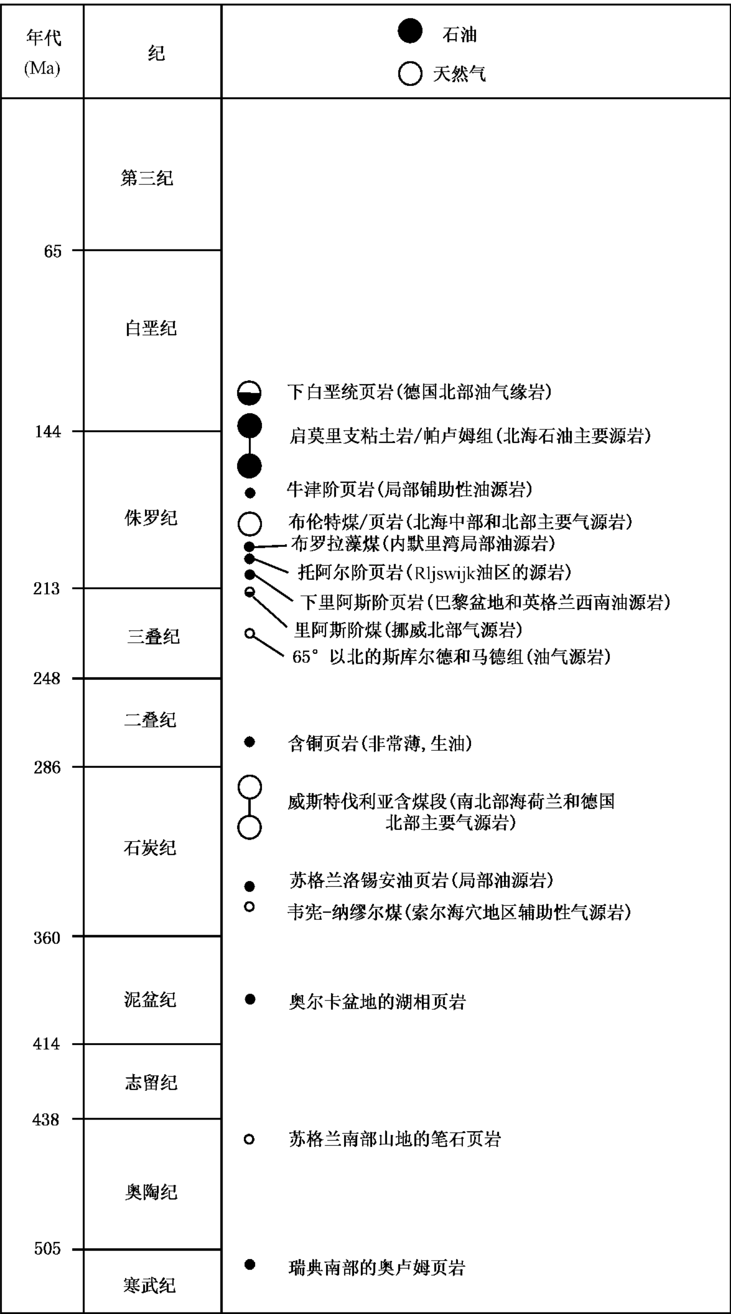


图 4—12　北海盆地烃源岩的地层分布

石炭系的许多气田都位于受中生代早期沉降作用和回返作用影响的地区,特别是在南北海盆地中表现非常明显,例如位于索尼皮特海沟内和大十四盆地内,或者位于地温梯度较高的地区。

石灰系母岩的演化史与干酪根的数量(数量巨大)或质量(全都是成气的干酪根)的关系不大,而与成熟度以及气体生成与储层构造发育的时间关系等有关。现将该系地层中各阶的烃源岩情况分述如下。

1. 狄南阶(包括韦宪阶和杜内阶)

劳格兰中央山谷的韦先阶油页岩是高质量的成油母岩,其总有机碳含量为11.2%。油产量约135m^3/t,这或许是最富的生油层,页岩中存在有藻煤或富碳油页岩,藻煤几乎全由压紧的群体藻—葡萄藻类所组成。从露头上来看,这类藻煤煌油页岩的成熟度,按其毗邻煤层(高—中挥发性烟煤)的煤阶来估计,是处于生油作用的成熟初期至中期。根据正构烷烃分布状况来判断,或者根据淡水藻已查明的生油能力来说,这种藻煤应该生成一种含腊量相当高的石油。洛锡安油页岩完全有可能是其邻近的科斯兰油田的油源。

韦宪阶油页岩在横向上可能有尖灭现象。但是远自格拉斯哥南部的林伍德,直至梗斯湾和洛锡安区都有该油页岩的露头分布。推测这套油页岩再往东亦有展布,但从已发表的钻井资料中,尚未见有这套油页岩存在的报导。

在北海中部高地有韦宪期煤层的存在,而且该煤层可能是一些较小气藏的气源岩。在北北海的其他地区,这套著名的下石炭统一般虽构不成重要的烃源岩,但却向上覆地层提供了一定数量的烃类来源。

2. 纳缪尔阶(中、下石炭统)

纳缪尔阶的岩层在局部地区具有生气的远景,也有生油的远景。诺森伯兰郡的韦宪阶和下纳缪尔阶灰岩中的页岩,以及斯克雷默斯顿煤组中的页岩,有机质丰富(总有机碳为1.08%~3.80%),壳质体和镜质体的含量几乎相等。这些岩层不仅能生成天然气,还可以生成石油或凝析油。

纳缪尔阶的海相页岩都具有生油的潜能。在纳缪尔阶的煤层相对增多的地区,它们可为又一个天然气源岩层。

3. 煤系(威斯特伐利亚阶—中石炭统)

威斯特伐利亚阶煤系由煤层和页岩互层组成,它属大型三角洲体系的沉积物。这个三角洲覆盖了西北欧的大部地区。北海地区内,这个三角洲的展布是北起北纬57°,南至华力西前山带,南北海盆地广布,北北海盆地中分布有限,而煤层则可能限于北纬55°30′以南的地区才有。威斯特伐利亚阶煤系的厚度一般为1000m至2500m,在德国西北部,煤夹层约占总厚的3%左右。煤层或与其共生的碳质页岩构成了主要的气源岩。

威斯特伐利亚阶可能是中央地堑和霍恩地堑中生气的源岩层,Day等人(1981)曾证明这两地堑中,镁灰岩(蔡希斯坦统)底面的埋深,局部地区可达10km。该煤系(如果保存有的话)就区域背景而论,预计已达到了烟煤的煤阶。估计其天然气生成作用的时间是三叠纪—侏罗纪。

在北北海盆地及其边缘陆地上,已发现威斯特伐利亚阶覆盖在华力西期后的侵入体之上,当这类地区存在有储层、构造和遮挡条件的时候,也可能有天然气的保存。在挪威北部海域地区的熊岛(BjoinΦya)斯瓦尔巴群岛(Svalbard)有石灰系的煤层和煤系分布。这套生气源岩也是北格陵兰盆地的组成部分。

四、二叠系

厚度大都不到1m的泥灰板岩层是北海地区二叠系惟一的生烃能力很高的沉积物,这层泥灰板岩在英国的达勒姆郡和德国北部有露头分布,并延展到北海南部和中部水下的大部分地区。总有机碳含量一般为5%~8%,属成油干酪根类型,氢指数在600mg/g之上。任何一种石油都可以其卟啉含量多少来判别之。北部北海地区一般来说,其石油的卟啉含量都很低。

但是巴肯油田的石油中含钒、镁量很高(参见表 4—7)。这表明可能来自泥灰板岩层。该岩层在巴肯油田的北部有分布。因该层厚度变化大,有些地区就不具有效的生烃作用。局部地区镁灰岩中有油气显示,这可能来自泥灰板岩层。Vanden Bosch(1983)报导过,荷兰陆上镁灰岩中的页岩和碳酸盐岩能生成石油。

五、三叠系

北海地区,三叠纪沉积物没有生油潜力。但是在北纬 62°以北的有些地区,三叠纪为持续海相沉积,可能具有生烃潜力,但因限于为数不多的露头,对其他烃潜力的认识有待深入。例如在斯瓦尔巴群岛南部的熊岛上,边缘海相的 Skuld 组和 Urd 组所含的页岩和粉砂质页岩,其有机碳含量达 2.0%,以生气干酪根为主,干酪根正处在生油窗的底部,在斯瓦尔群岛上,中三叠统 Botneheie 组的页岩含有大量生油和生气干酪根(总有机碳为 2.9%～5.5%),其成熟度处于未成熟晚期到生油高峰期。根据 Ronnevik 等(1983)的岩相图,这套高质量的生油、生气母岩可以展布到北纬 65°以南的地区。英格兰南部三叠纪顶的瑞替阶在局部地区可能发育成生油或生气的岩相。

六、侏罗系

罗伯逊国际有限研究公司(Robertson Research International Limited)利用 150 个井段的样品在大量分析的基础上,对北北海盆地中石油地球化学进行了区域性研究。研究认为,从寒武纪—近代沉积中都可能有生油岩,但最主要的生油岩是启莫里阶粘土层和相当于晚侏罗世到早白垩世的地层。启莫里阶粘土层中保存的生油有机质是由蜡质植物碎屑和海洋环境的藻类物质衍生来的。东设得兰盆地及埃科菲斯克两个重要油区的石油是在含“蜡质”陆生植物和海相藻类的生油岩中生成的。在挪威—丹麦盆地的同时代地层,布雷姆(Bream)层中的勃格拉姆段(Borglam Member)也是晚侏罗世的重要生油、生气源岩。

启莫里阶粘土岩组及其同期地层(如勃格拉姆段)都是北北海盆地上侏罗统中的主要油源岩,而中侏罗统的煤层,则是天然气的主要源岩。图 4—13 给出的是北北海盆地侏罗系—白垩系的油气源岩的代表性总结,下面分统概述其源岩的发育情况。

1. 下侏罗统(里阿斯阶)

在北北海盆地,下侏罗统发育了以生气为主的源岩,只有上里阿斯阶(托尔阶),在局部地区发育为生油岩相。中央地堑和威其格朗德地堑以及默里湾盆地外围等地区,下侏罗统缺失或是只有其侵蚀残余存在。在丹麦盆地,佛吉里斯勒夫组的开阔海相页岩,其总有机碳含量虽然低,但是有可能生气的。在霍思地堑内,除了有 40m 左右的上侏罗统粘土岩以外,大都认为是缺失中下侏罗统地层的。

在各地堑区,大多数缺失下里阿斯阶,或者只有它们的残余存在,因而在这些地区没有下侏罗统的油气源岩。但在北北海盆地的其他一些地区,例如东设得兰盆地保存在斯塔特夫约得群和都林群的页岩层,它们属贫有机质的生气页岩,和其上覆中侏罗统相比,是不重要的生气母岩。Ronnevik 等人指出,土阿辛阶德雷克组有机质较丰富的页岩,在维京地堑和霍达盆地的总有机质碳平均含量为 2%,属成油干酪根,在中央地堑的挪威区内,则属成气干酪根。

北纬 62°北,成熟的下侏罗统煤层以及该盆地更深处的下侏罗统的海相页岩,在哈顿本肯地区为成气母岩,在特拉勒本肯(Traenabanken)地区为成油母岩。在斯瓦尔巴群岛,Bjoroy 和 Vigran(1980)曾报导位于未分组的侏罗系底部有富含成油、成气的混合型有机质页岩。

纪/系 群/组	岩性	厚度范围 (ft)	总有机碳 (TOC，%)	抽提有机物 (EOM,ppm)	EOM/TOC	碳优势指数 (CPI)	镜质组反射率 (R_o)
古新统		548～820	0.43(64)	141(3)	3.3(3)	1.45(3)	0.41(3)
上白垩统 设得兰群		1758～3998	0.78(20)	172(40)	2.64(40)	1.71(20)	0.43(2)
下白垩统 克罗默诺尔群		0～482	1.04(4)	78(2)	1.41(2)	——	0.71(2)
上侏罗统 启莫里支粘土岩组 (热页岩)	●	0～298	4.58(4)	2160(4)	4.00(4)	——	——
中侏罗统 希瑟组		0～994	2.24(16)	350(9)	1.71(9)	1.68(8)	0.40(2)
中侏罗统 布伦特组	●	0～1023	——	——	——	——	0.44(5)
下侏罗统 邓林组		0～1403	1.47(86)	234(38)	1.95(38)	1.68(36)	0.59(6)
下侏罗统/三叠系 国家湾	●	0～1016	0.44(19)	——	——	——	0.68(4)
三叠系 科未伦特组		最大钻进 6032	0.35(56)	50(6)	1.71(6)	1.37(3)	0.73(8)

（ ）取值数量　● 石油储量

图 4－13　北部北海盆地一口钻井中的代表性母岩

注：1ft＝0.3048m

2.中侏罗统

北北海盆地，中侏罗统的沉积作用不强烈。除默里湾盆地有富藻的成油页岩和煤层以外，在维京地堑，以及霍达盆地埃格朗得盆地和丹麦盆地北部等地，中侏罗统为近海相和三角洲相的砂岩、页岩和煤层组成，具有生气的潜力。上述层序中，煤层所占的比例很小。Goff(1983)估算在弗里格气田的供气面积内布伦特煤层的总厚为10m，而且他提出弗里格气田天然气的同位素成分表明，生气作用不是来自煤层而是来自页岩。但有人提出，斯莱普纳尔(Sleipner)大气田的天然气是来自中侏罗统的煤层。中侏罗统的煤层和页岩往往含有较多的已蚀变的镜质体和惰质体，这种情况，多少使它的生气潜能降级。

中侏罗统页岩的总有机质含量一般可高达5%，和大多数煤系层序一样，总有机碳含量的变化很大。这套粘土岩相的干酪根成分表明它们具有生气能力，即干酪根以镜质体型为主。在维京地堑内，这套页岩含有少量成油和成凝析油的藻类、树脂和角质层。尼尼安油田的卡洛夫阶页岩含有多达4%的总有机碳和成油干酪根。还有，Bissada(1983)曾报导默里湾地区的中侏罗统富含有机质(总有机碳达1.4%～2.7%)岩层和煤层。

在默里湾岸边布罗拉剖面，易于生油的响煤和共生的页岩中见到密集的葡萄藻属淡水藻。这种藻类可能就是高蜡原油的一种来源。

就成熟度而言，上述煤层和页岩在维京地堑深埋约3.9km，是会有成熟的天然气生成的。Day等人(1981)作的三叠系顶到白垩系底的深度图上，用内插法求出天然气生成作用区的界限是处在维京地堑和威其格郎德地堑二者间的中央部分，而东设得兰盆地和霍达盆地、埃格朗

德盆地以及丹麦盆地北部都不属生气的范围。据 Cooper 等(1983)测得的陆上镜煤反射率资料(达 0.87%),也说明尚没有达到生气的煤阶。默里湾的中侏罗统,埋深约 2000m 至 2100m,据 Pay 等人(1981)的区域地震图,它在该区以外的地区可能有更大的埋深。北北海以西,在斯基(Skye)岛和内(Inner)岛地区,中侏罗统为砂岩,还有含煤的能生气的大湾组。Minch 盆地的露头,可作为这两个地区的代表。在罗纳(Rona)海脊的西北翼,中侏罗统为厚层暗灰色海相页岩,而在海脊其他地区和设得兰盆地西部,据 Ridd(1981)报导有相似的岩相。

北纬 62°以北,安道雅(Andoya)岛外围的中侏罗统,不但是未成熟的生气沉积物(总有机碳为 4.6%~12.3%),也含未成熟的富有机质的生油沉积物(总有机碳 1.0%~11.5%)。对挪威的斯匹次卑尔根群岛的未细分的侏罗系—白垩系页岩层序的研究也表明其含生油和生气的干酪根数量较大(总有机碳为 0.45%~16.0%)。

3. 上侏罗统和下白垩统底部(牛津阶至里亚赞阶)

启莫里阶粘土岩组正好处在这个时限之中,启莫里阶粘土岩组是北海主要的油源岩(与油伴生的还有凝析油和天然气),该粘土岩组覆盖于牛津阶之上,在发育为泥质岩相的地区,仍然不失为具有良好生气源岩的特征,而且在局部地区还具有很好的生油潜力。

(1)牛津阶。

北北海地区的牛津阶页岩相当于维京地堑的赫塞尔(Heather)组、中央地堑的豪格孙德(Haugesund)组以及菲斯克本克(Fiskebank)准盆地的埃格桑(Egersund)组,普遍都是富有机质的生气源岩。在斯塔特夫约得气田,赫塞尔组的总有机质含量平均为 2.24%,属于生气源岩。有人认为,赫基尔组可能是斯莱普纳尔气田凝析油的母岩。牛津阶页岩在个别地方具有一定的生油能力。这层页岩厚度大的地方(例如东设得兰盆地)就使得启莫里阶粘土岩组增厚。例如,Bissada(1983)发现在英属 14 分块区和 15 分块区的牛津阶页岩层,所含有机质(8 口井的总有机碳平均值为 1.4%~8.8%)要比上覆的启莫里阶粘土岩组要多,而所含生油干酪根则和上覆启莫里阶粘土岩组一样多。

在英国陆上,牛津阶粘土岩含有机质的贫富程度不一。如在英格兰南部多塞特郡的牛津阶粘土岩虽富含有机质,但是属未成熟的油源岩。在英格兰中部的牛津阶粘土岩中有两段岩层,其总有机碳平均值为 2.9%和 4.1%。

挪威北部的特罗姆斯郡,其上侏罗统为泥质岩,这套粘土岩的生油潜力与上覆的启莫里阶粘土岩相差不多,在斯瓦尔群岛,未分层的侏罗系剖面中,亦含有牛津阶的层段,发现其中存在有 II 型生油干酪根,估计也具有生油潜力。

(2)启莫里阶粘土岩组和伯卢姆(Borglum)组。

这两个组是北北海地区主要的生油岩。在北北海的大多数地堑区,这两个组都发育着富含有机质的“黑色”页岩,正如前面提到过的,这套岩组的普遍特征是自然伽马测井具有高值,由此得了“热页岩”的名称。表 4—3 列出了各地区有代表性的总有机碳平均值。同时还列出了启莫里阶粘土岩组源岩研究文献目录。总有机碳含量随地区不同而变化,也随岩性变化而变化。

表 4—3　北海地区启莫里阶粘土岩组分和博卢姆组的总有机碳含量

地　　区	TOC/%	参数文献	说　　明
北海,未指具体地区	2.7	Fuller,1980	=3.25%的有机质含量
北海,综合性的	平均 7.1	图 3—5	2%~12%的变化范围,有机质较富的样品

续表

地　　区	TOC/%	参数文献	说　　明
地区不明的北海钻井	5.6,4.9	Brook 和 Thusu　1977	上部和下部的层段
埃科菲斯克	1.4～2.6	Van den Bark 和 Thomas,1980	挪威石油勘探公司 2/4－19B 井
默里湾盆地外围	1.0～3.8	Bissada,1983	英国 14 分块区和 15 分块区,Piper 气田钻井
维京地堑南部	2.5～4.5	Pearson 等人,1983	英国 16/22－2 钻井
内默里湾	3～6	Pearson 和 Warkms,1983	英国 12 分块区各井的变化范围
布雷区钻井	平均 4.29	Reitsema,1983	英国 16/7a－19N 钻井
东设德兰盆地	5.4	Goff,1983	估算的平均值
尼尼安	6.9	Albright 等人,1980	变化范围
特尔气田	3.4～8.1	Gronthem 等人,1980	英国 210/25－3 井,平均为 6.8%
斯塔夫约德	平均 4.58	Kirk,1980	许可证 0.37 号平均值
挪威北海的南部	7	Hamar 等人,1983	热页岩中为 7%～17.5%
挪威陆架的南部	平均 2.1(5.0)	Fuller,1975	挪威石油勘探公司 2/11 井岩心平均值
丹麦属北海	平均 3.85	Thomsen 等人,1983	中央地堑西北部 1－1 钻井
丹麦属北海	平均 1.59	Thomsen 等人,1983	中央地堑东南部 M－8 井
挪威属北海	平均 5	RΦnnevik 等人,1983	变化范围 1%～5%
多塞特型剖面(英国)	平均 3.75	Fuller,1975	沥青质页岩
多塞特型剖面(英国)	平均 1.6	Fuller,1975	灰色粘土
多塞特型剖面(英国)	15.3～40	Gosgrove,1970	最富的油页岩夹层
约克郡的露头	平均 7.95	Fuller,1975	沥青质页岩
约克郡的露头	30.9	Fuller,1975	油页岩
约克郡的露头	3.4	Fuller,1975	暗灰色页岩
苏塞尔兰的露头	平均 5.5	Fuller,1975	黑色页岩
斯瓦尔巴群岛的安多亚	1.4,4.3	Dypvik 等人,1979	挪威北部斯匹次卑尔根群岛

“热页岩”(启莫里阶粘土岩及其同期地层)是跨时代的地层。例如在 Fiske 准盆地中“热页岩”段属伏尔加(Volgian)期(侏罗系最上部),而毗邻的中央地堑,在其挪威区块的“热页岩”则属里亚赞阶(白垩系底部)的曼达尔(Mandal)组。Thomson 等人(1983)也曾指出,丹麦属中央地堑的最深部位(西北部),其生油页岩出现在上侏罗统的顶部,而该地堑东南翼上,有机质普遍较贫乏,其质量好的母岩出现在接近上侏罗统底部。

“热页岩”的代表性干酪根类型是属细菌降解过的海生浮游藻屑(非晶质腊质体)和已降解的陆生腐殖质(非晶质镜质体),这二者混合而成的干酪根。这类非晶质组分中混杂有数量不定的微粒状镜质体(木质屑)和惰质体——为高度蚀变(氧化的)陆生植物。陆生植物孢子和海藻(例如沟鞭藻类和管球藻属)的数量为痕量至少量。眼球状黄铁矿分布普遍。这表明是硫酸盐还原细菌作用的结果。在一块全岩心的光面中,这种干酪根在反射光显微镜下,呈现为散射的荧光底色。而在透射光下,单个干酪根呈现为非晶质的,表面粗糙且发荧光的团块状物质。这种混合型干酪根经热解分析,表明它们大都属于生油的Ⅱ型干酪根。

Fisher 和 Miles(1983)曾报导在维京地堑南部和威其格朗德地堑等地区内,启莫里阶粘土岩组中的干酪根,用光学显微镜对其特征进行鉴定,发现该组中干酪根在时空上都有类型不同

的变化。从地层上看，该区内的伏尔加期地层含有质量最好的生烃干酪根；从空间上看，生油干酪根的大多数都沉积在地堑的中央，沉积在距隆起地形很远的地方以及距沉积物来源很远的地方。

岩石热解分析资料说明启莫里阶粘土岩组在一条厚160m剖面中从上至下的总有机碳含量的变化以及4种干酪根类型的变化（图4—14a），还说明了从地台边缘至盆地中心干酪根的类型变化趋势（图4—14b），从而归纳出时空的变化概念。这个模式可总结为，由盆地中心向古海岸线方向，陆原物质组成生气的干酪根在增多，由海洋浮游生物或细菌形成的成油干酪根在减少。

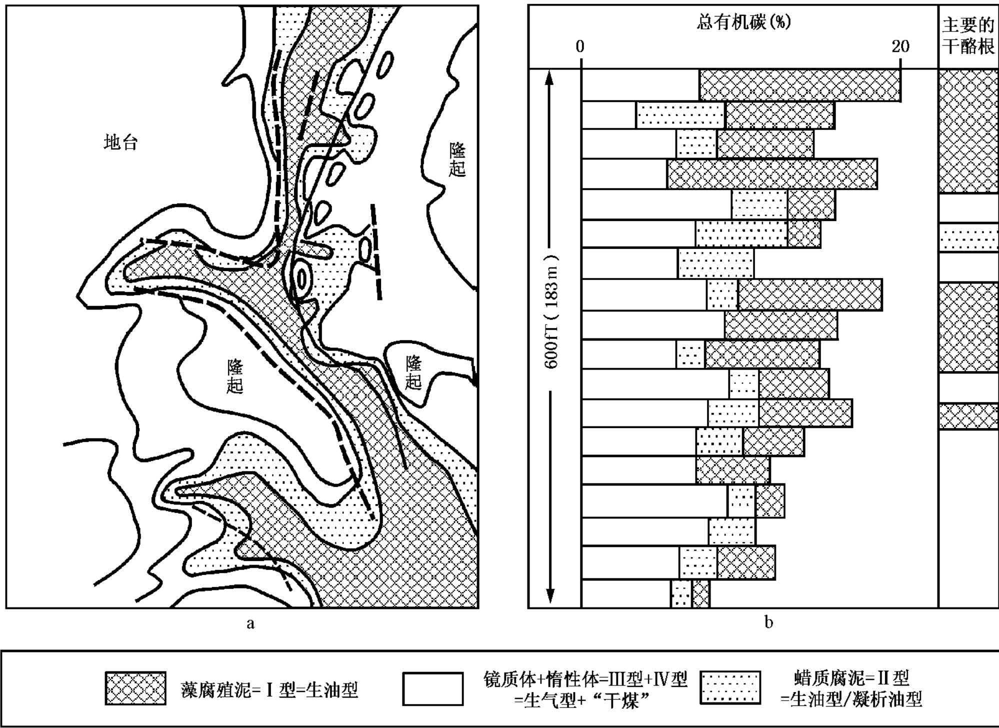


图4—14　北部北海盆地启莫里阶粘土岩组和伯卢姆组的干酪根分布图

（据Barnard和Cooper，1981，1983资料）

a—推测的区域分布略图；b—在183m厚的启莫里阶粘土岩组剖面中的垂向分布应注意：远离构造高地和沉积物源区，则干酪根的品质变好（a）；而且在该区顶部的生油干酪根比在其底部的要多（b）

从以上的讨论，可明显看出“热页岩”具有变化大的特征。但是为了对母岩和原油作粗略的对比，表4—4中归纳了一些常规的特征值。从中央地堑南部，直到维京地堑北部，该区原油组合的高度均一性，说明这个归纳是有用而有意义的。

表4—4　北海代表性的启莫里阶粘土岩组热页岩的一些常规特征值

特　　征	数　　值	参数文献	说　　明
TOC/%	5	表4—3	实际的平均值
H/C比率（干酪根）	0.9～1.2		未成熟的干酪根
岩石热解分析的氢指数	450～600	Barnard等，1981	未成熟的干酪根
干酪根类型	Ⅱ	Barnard等，1981	岩石热解分析

续表

特　　征	数　　值	参数文献	说　　明
$\delta^{13}C$/‰(干酪根，PDB)	−27.6～−28.7(−25)	Reitsema,1983；Fuller,1975	布雷，马里—国家湾地区
有机岩类学			
非晶质脂质体/%	30～80		细菌降解的藻类
微粒状脂质体/%	1～10		甲藻(或沟边藻)、孢子等
镜质体(非晶质＋微粒状)/%	20～70		(非晶质＋微粒状)
惰质体/%	1～25		丝质体和半丝质体
油产量(bbl/acre−ft)每1%的总有机碳含量	0	图4−7	成熟高峰期的母岩

注：各百分数都是按干酪根组分占据载片上的面积百分数目估得出的。

(3)启莫里阶粘土岩组的沉积环境。

该岩组的沉积环境，一直是争论不休的问题，从全球来看，晚侏罗世是海进作用的时期，海进有利于富含有机质岩类的沉积，这可能是由于生物产出率大，沉积速率高且水中溶解氧的浓度低之故。

Gallais 曾以油页岩中夹有颗石藻灰岩为依据，提出了因浮游植物的大量繁殖，超过了有效的溶解氧量，所以有缺氧的富有机质的沉积物保存下来的观点。此后 Tyson 等人(1979)又提出，缺氧是颗石藻繁盛的原因而非结果。该模式是设想存在有一层处在缺氧深度的层状水体(盐度速变层或温度速变层)，这水层能周期性地翻转，从而释放出氧分，引起藻类的繁盛。后来，Irwin 又对上述模式作了修改，他报导说，这套油页岩相的内部有生物扰动现象。他认为，在一个 O_2-H_2S 交界面以下，生物成因的方解石都要迅速地溶解掉。Cornford 和 Douglas 等人又提出，陆源有机碎屑的汇入，也可以使陆棚区的氧背景值降低的看法。

很明显，在浪基面以下，缺氧环境下发生的沉积作用，就具有大量的浮游生物沉积(图4−15)，由于目前在北北海各"高地"上见到缓慢堆积层序，说明过去的水深可能不大(例如在200m以上)。粗碎屑和富有机质相共生的地方(例如布雷区)，表明过去有顺坡搬运的作用，但是水

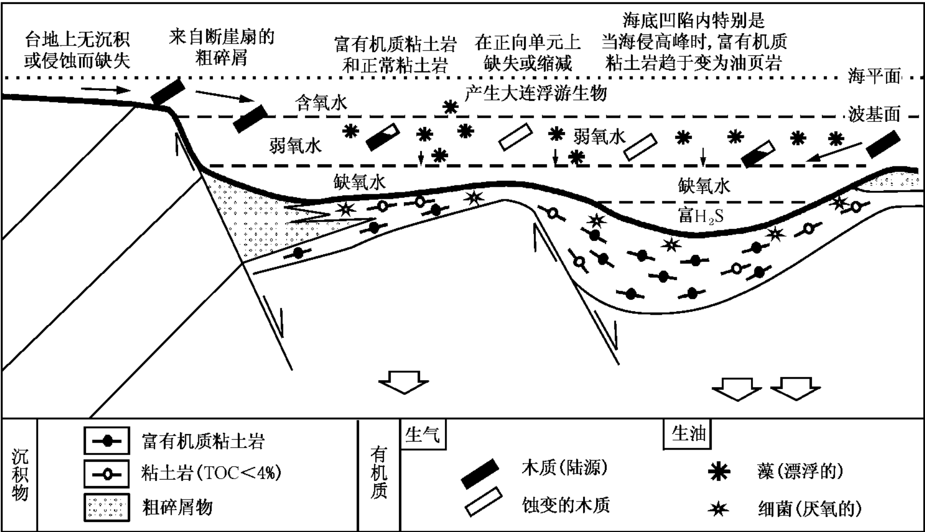


图4−15　北部北海盆地启莫里阶粘土岩组富有机质页岩沉积环境条件模式

深一直不需要很大。顺坡搬运的粗碎屑与断层崖共存时，反映了有同沉积期的断层活动。图 4—15 表明的是浅海水中的沉积作用，图上反映了浅海表层水生物产量高、深部水层缺氧，这两层水偶尔有混合作用。富有机质的“油页岩”相可能在断陷作用形成的海底深凹陷内沉积下来。凹陷中聚存高度缺氧的水，且有较高的沉积速率，这些因素都有利于有机物的保存。凹陷周围的陆地区必定有很丰富的高等植物，从而提供了干酪根的镜质体组分。

(4)石油—源岩对比。

利用石油—源岩对比法，已多次证明启莫里阶粘土岩组具有和北北海石油匹配得最好的特性。Reitsema(1983)曾从前人的详细研究成果出发，用正构烷烃的异戊二烯烷烃、甾烷和三萜烷等的分析，以及用稳定碳同位素曲线匹配法等来证明布雷地区的石油和“热页岩”是关联的。Miles 等人(1983)指出，在维京地堑南部和威其地堑内可以对干酪根的特定类型、成熟度和石油性质等进行对比。

近来已大量地利用带计算机装置的气相色谱—质谱仪(GC—MS)来研究甾烷和起指纹作用的三萜烷，以便进行石油和源岩的对比。Cornford 等人(1983)用了大约 100 个北北海盆地石油样品和“热页岩”的抽提样品来作详细的对比。他明确地提出，“热页岩”的每个成熟阶段都生成一种可资识别的石油类型(图4—16)。在特尔区(英属210/25区块)Grantham等人曾

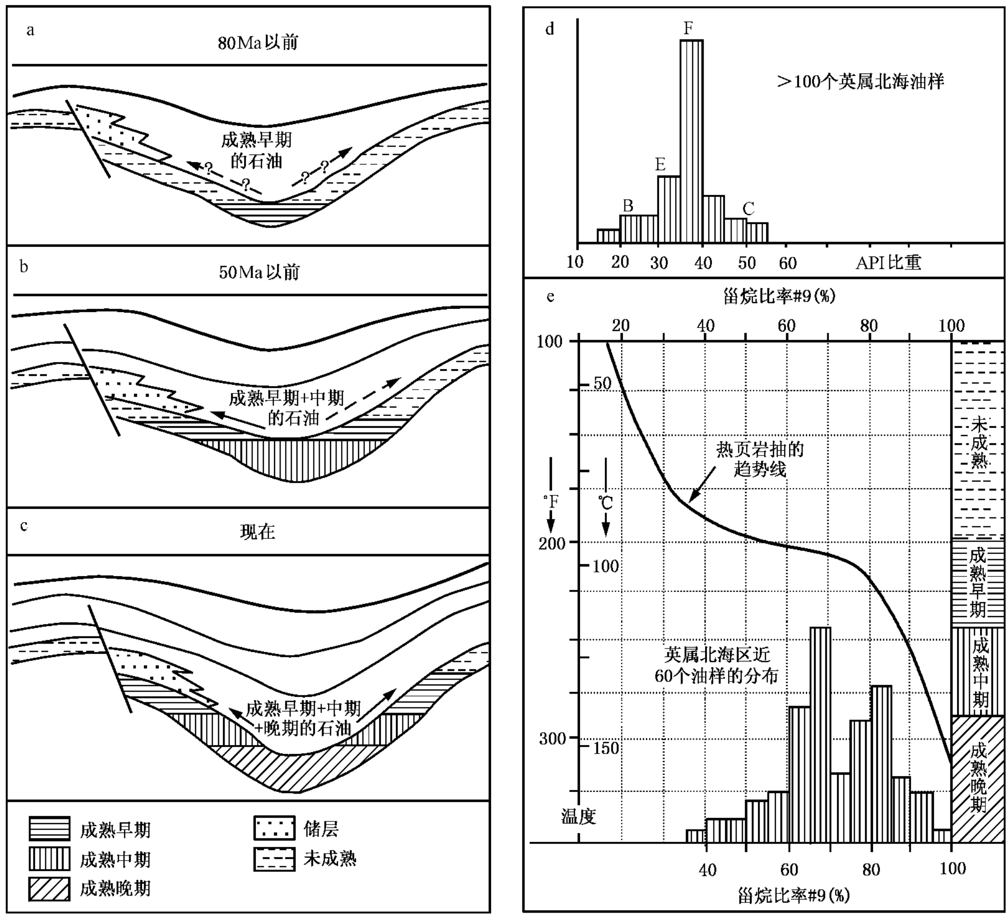


图 4—16　受母岩成熟度控制的北部北海石油的性质

a,b,c—埋藏在一个地堑中的母岩的渐进生油过程；d,e——表示成熟过程对石油性质的影响

用 C_{27} 和 C_{28} 三萜烷对“热页岩”的某些特定层段作鉴定，从而进行石油—源岩的对比，取得了良好的效果。用旋光性和稳定碳同位素资料进行北北海石油和上侏罗统各源岩的对比，同样也能取得很好的效果。

虽然，原油和生油岩抽提物的一些参数，如碳同位素，对确定油源类型非常有用，但是在文献中常常建议用由生油岩运移到储集层中的化学标志组分，进行石油—源岩对比。通过气相色谱和气相色谱/质谱分别识别直链烷烃组分，特别是多环甾烷及三萜烷，相似特征就是极好的对比方法。含有大量Ⅰ类腐泥型和$Ⅱ_a$ 类腐泥型干酪根的生油岩的地球化学特征列在表 4—5 中。

表 4—5　典型腐泥型油岩的地球化学特征

	样品 A	样品 B
	藻质腐泥型	腊质腐泥型
总有机碳/%	8.18	6.88
岩石评价资料		
氢指数	499	286
氧指数	20	32
T_{max}	409	439
潜在生成量/10^{-6}	40800	19700
成熟度		
孢粉染色指数	4.5	5.0
镜煤反射率/%	0.8	0.7
烃含量/10^{-6}	1795	1950
碳同位素资料/‰，PDB		
烷烃	−26.6	−30.4
岩烃	−26.7	−30.4

油源岩中的正构烷烃组分在成熟的过程中变化很大。北部北海盆地的烷烃和两个最普遍的腐泥型生油岩的成分变化亦十分明显，在未成熟和早期成熟阶段有着显著的差别（图 4—17）。藻质腐泥型样品的正构烷烃的分布向链长度区弯曲（$n-C_{20}$ 左右）而“蜡质”腐泥型生油岩中含有非常丰富的重质烃（达 $C_{32}{}^{+}$），并含有大量的支链和多环链烃（在正构烷烃之间表现为频繁出现的小峰），腐泥质生油岩的 GC/MS 研究表现出，在烷烃扫描（图 4—18）$C_{27}{}^{+}$ 区内，多环三萜烷和甾烷的组成和相对丰度有明显差别。甾烷相对以低浓度存在，而重新排列的甾烷几乎根本不存在。相反，含陆地植物较多的“蜡质”腐泥型含丰富的三萜烷和甾烷，并且由于在搬运和早期成岩作用过程中细菌的改造，使重新排列的甾烷也比较丰富。由于藻质腐泥型的化学特征相对弱，即当在藻质腐泥型中出现“蜡质”腐泥型的时候（哪怕占相当小的比例），其气相色谱/质谱图也和“蜡质”腐泥型相像。对北北海地区用气相色谱/质谱技术作石油—源岩对比所得结果应当是可信的。

在英属北北海地区石油 API 密度分布图中（图 4—16d）已鉴定出 4 种石油类型：图中 B 为生物降解的石油；C 为凝析油或轻质油；E 为成熟早期的石油；F 为成熟阶段的石油。全成熟阶段的石油是含有油源岩成熟早期，成熟中期和晚期各阶段所排出石油的分子特征的混合产物。成熟阶段的命名，是从原油的各种性质中，采用源岩各成熟阶段所测定的甾烷比的趋势曲

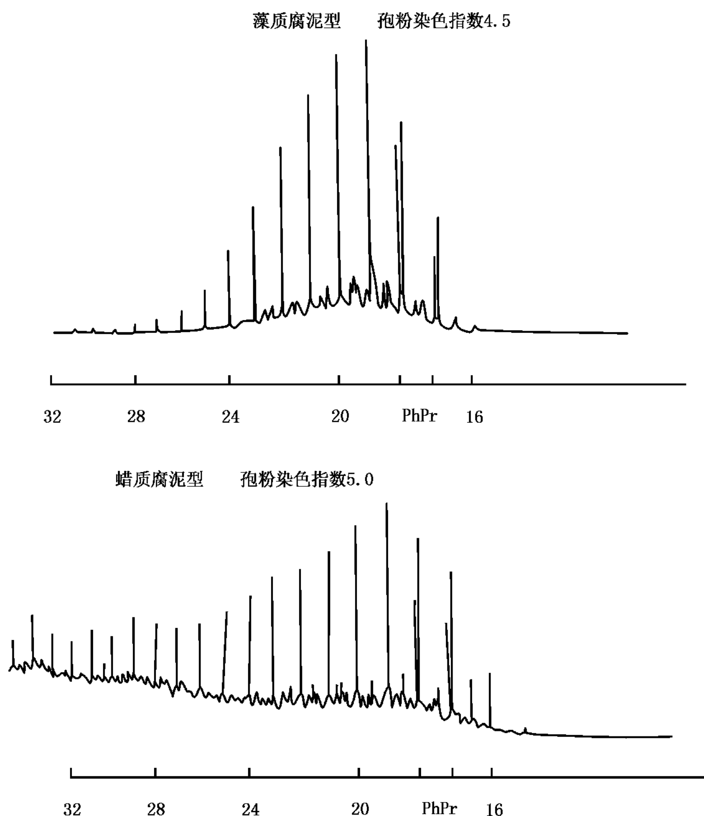


图 4－17　北北海盆地中两类腐泥型生油岩中烷烃的气相色谱

线(e)和从收集的约 60 个油样所测定的甾烷比相比较而定下来的。成熟初期的石油不多，而且一般都分布在盆地的侧翼上的上侏罗统储集层中。大部分石油中都含有全成熟阶段源岩产出的油分子特征，或者含油源岩成熟晚期产出的部分油分子特征，这类石油经常是处于“热页岩”排烃性能较差的条件下全成熟阶段的石油。正如该地堑模式图 4－16c 中那样，在接受了多成熟期石油的储集层中可以见到。

(5)容积模拟。

具有范围明确的单一油源岩以及成熟演变史简单的北北海油区，是开展并检验用容积模拟来计算烃类生成量和聚集量的理想地区。Goff(1983)试图用已知有机质丰度的成熟源岩体积来计算维京地堑北部(东设得兰盆地)的石油量。Goff 用的公式如下：

$$已生成的石油量 = SRV \times OMV \times GP \times FOIH \times TR \times VI$$

式中　SRV——源岩体积，m^3；

OMV——按体积计的有机质含量(从 TOC 求出，见下文)；

GP——生成能力(干酪根的生油，部分启莫里阶粘土岩组的生成能力＝0.7)；

$FOIH$——石油在烃类产出物中所占比重(据 Goff 为 0.8)；

TR——转化系数(其大小以干酪根转化的程度来定，这取决于源岩的成熟度)；

VI——生成石油作用的体积增量(据 Goff 为 1.2)。

这个公式还必须加上一个运移圈闭系数。Goff 通过上述计算，他求得生成运移和圈闭的总效率为 20％～30％。但他忽略了对一个主要的系数作充分的讨论，即供油面积的确定，这

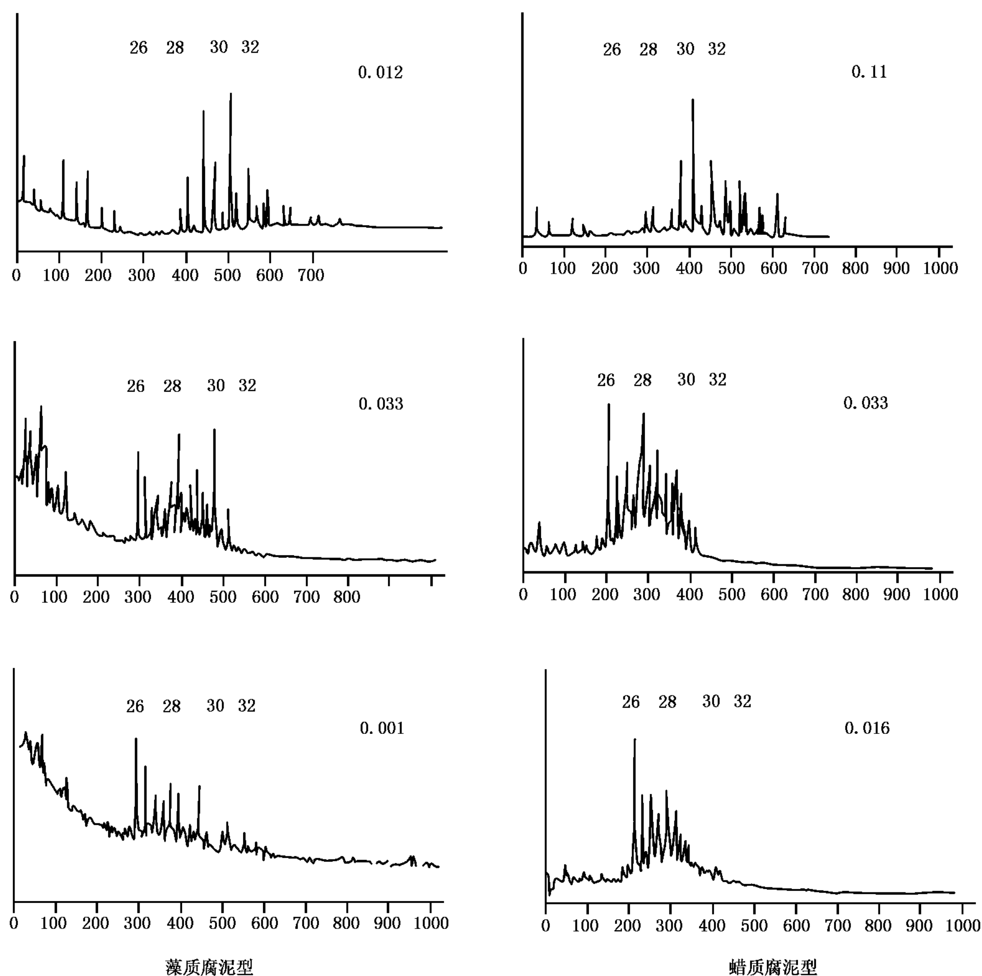


图 4－18　两类腐泥型生油岩烃的气相色谱/质谱图

注:引用值如－0.001,是由 n－C_{30} 的大量多环烃的参数计算的

对远景评价是很重要的系数。

(6)成熟度。

从白垩系底面的地震深度图(如图 4－19),可以估计启莫里组和勃格拉姆组的成熟度。Goff(1983)做出了东设得兰盆地和维京地堑的较详细的地震深度图,而 Michelsen 等人(1983)做出了丹麦中央地堑区的地震深度图。采取如表 4－6 的资料,表中的生油温度界限是按地温梯度的变化关系,如 25℃/km、30℃/km、35℃/km,再减去海底温度 4℃(40℉),即可换算成深度,然后用深度图表确定各成熟源岩的分布面积。这个方法在北北海有地温梯度变化资料的大多数地区(如图 4－10 所示)已推广使用了。

Rønnevik(1983)发表了挪威北海区的成熟度图,Fisher 等人(1983)发表了默里湾—维京地堑南部的成熟度图。Goff(1983)制成了东设得兰盆地的一系列图件,这些图件说明了从该盆地中央到盆地边缘成熟地区随时间逐步扩展的情况(图 4－21)。然而,Goff 在用这种方法时,将温度等同于成熟度,忽略了有效热作用时间的影响。在北北海地区内有第三系的抬升和侵蚀的作用,也还有晚第三纪和近代的时快时慢的沉降作用(图 4－20)。

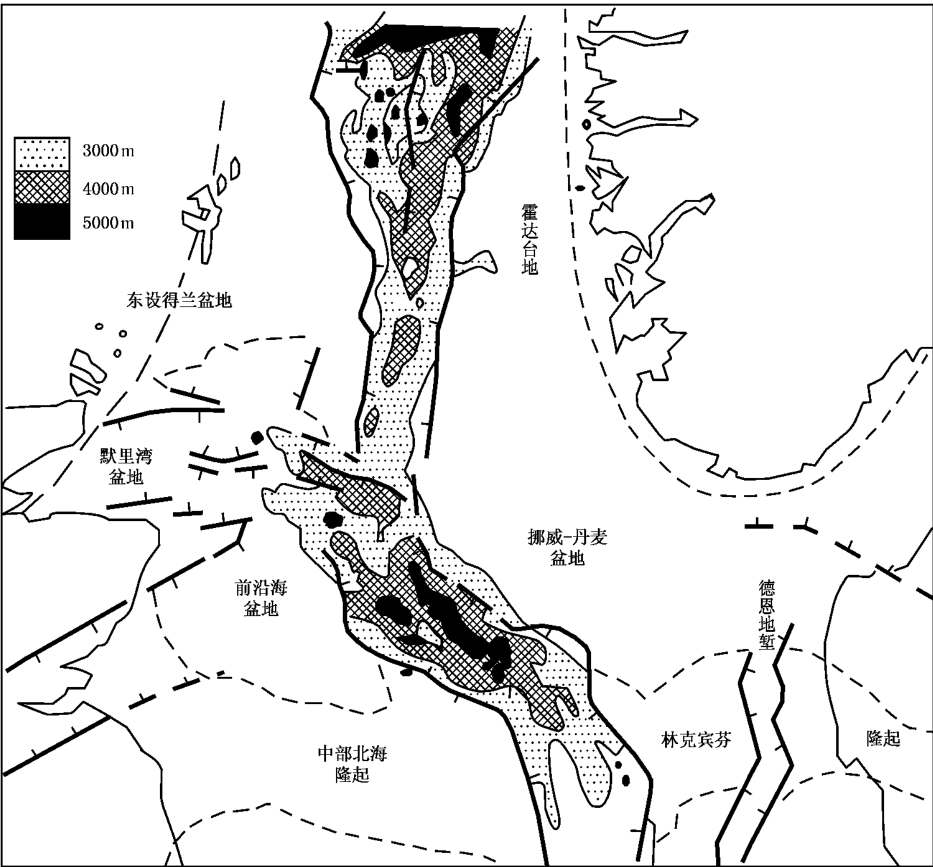


图 4—19　启莫里阶粘土岩组/伯卢姆组顶面埋深图

（简化自 Day 等，1981）

表 4—6　地温梯度为高值、平均值和低值的各地区各成熟度分级和深度的关系

石油(伴生气)的成熟度分级	温度		各地温梯度界限所对应的深度(km)		
	℃	°F	25℃/km	30℃/km	35℃/km
未成熟					
	80	175	3.0	2.5	2.2
成熟早期					
	110	225	4.2	3.5	3.6
成熟中期					
	130	265	5.0	4.2	3.6
成熟晚期					
	155(?)	310(?)	6.0	5.0	4.3

现在已知道，在埋藏迅速的条件下，会妨碍镜质组反射率的增大，但是，现在尚不明了的是，就每立方公里源岩生成多少立方米油气而言，妨碍烃类生成作用的，除了埋藏极迅速这个条件外，还有别的什么条件没有？由于北北海的大部分地区第三系的埋藏都很均一，再加上北北海盆地内已确定了计算用的各温度分带，所以除了诸如默里湾这类上升受侵蚀的地区，以及像中央地堑新第三纪埋藏速率很高的地区以外，整个北北海地区都可以较有把握地使用这些成熟度的分级阶段。

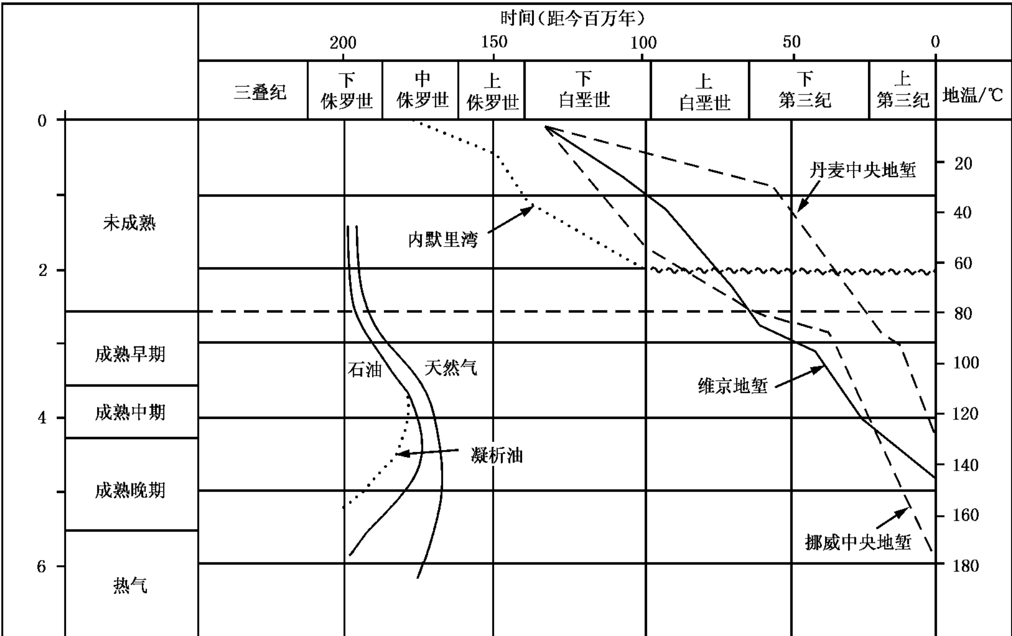


图 4—20 北部北海上侏罗统油气生成作用时间图(地温梯度为 30℃/km)

从图 4—20 明显地看出,处于维京地堑和中央地堑最深部位的启莫里阶粘土岩组,在晚白垩世和第三纪早期已达成熟初期阶段,而在早第三纪中期就进入完全成熟阶段。生烃作用从那时以来一直持续地进行着,且其生成作用的重点向上移到了盆地的侧翼地区(图 4—16a—c)。

在北北海盆地尽可能准确地确定生成油气的早期成熟阶段,对于该区的勘探工作是非常重要的,因为这样可识别早期成熟的石油从源岩有效地排出的那些地质环境。这种认识将有利于在各地堑、各地区的侧翼上优先勘探已进入临界成熟度地区的石油。

七、白垩系

下白垩统(不包括里亚赞阶,见前述)在北北海大多数的地区都以页岩相为主。其主要的沉积中心(厚度>500m)出现在默里湾盆地、维京地堑、中央地堑、霍达盆地、埃格桑盆地和北丹麦盆地等处。在上述各盆地中,据查下白垩统剖面都含有数量中等至大量的生气干酪根。

有人曾报导,默里湾盆地 7 口井的白垩系页岩的总有机碳平均值为 0.6%~1.4%,除 14/20 块区中为低等植物成因的干酪根外,大多数井的干酪根都属陆生植物型的生凝析油和生气的干酪根。国家湾地区,下白垩统克罗默诺尔(Cromer Knoll)组的总有机碳平均值为 1.04%,属生气干酪根。

北纬 62°以北,在安多亚岛上,Skarstein 组(阿普第阶/巴列姆阶)的最上部有数量不等的已成熟生油、生气干酪根。在斯瓦尔巴岛上也有生油、生气的富有机质页岩。

下白垩统的区域性成熟度可以从白垩系底面深度图(图 4—19)来推导,该图表明在中央地堑,维京地堑和威其格朗德地堑将有成熟的天然气(R_o>1%;>4000m)。在北德盆地同样达到了天然气生成的成熟度,因而在该盆在已有了工业价值的天然气田,就是明显的例证。

八、第三系

北北海盆地内的第三系沉积物,由于其成熟度低,不可能成为有效的油气源岩。已有资料

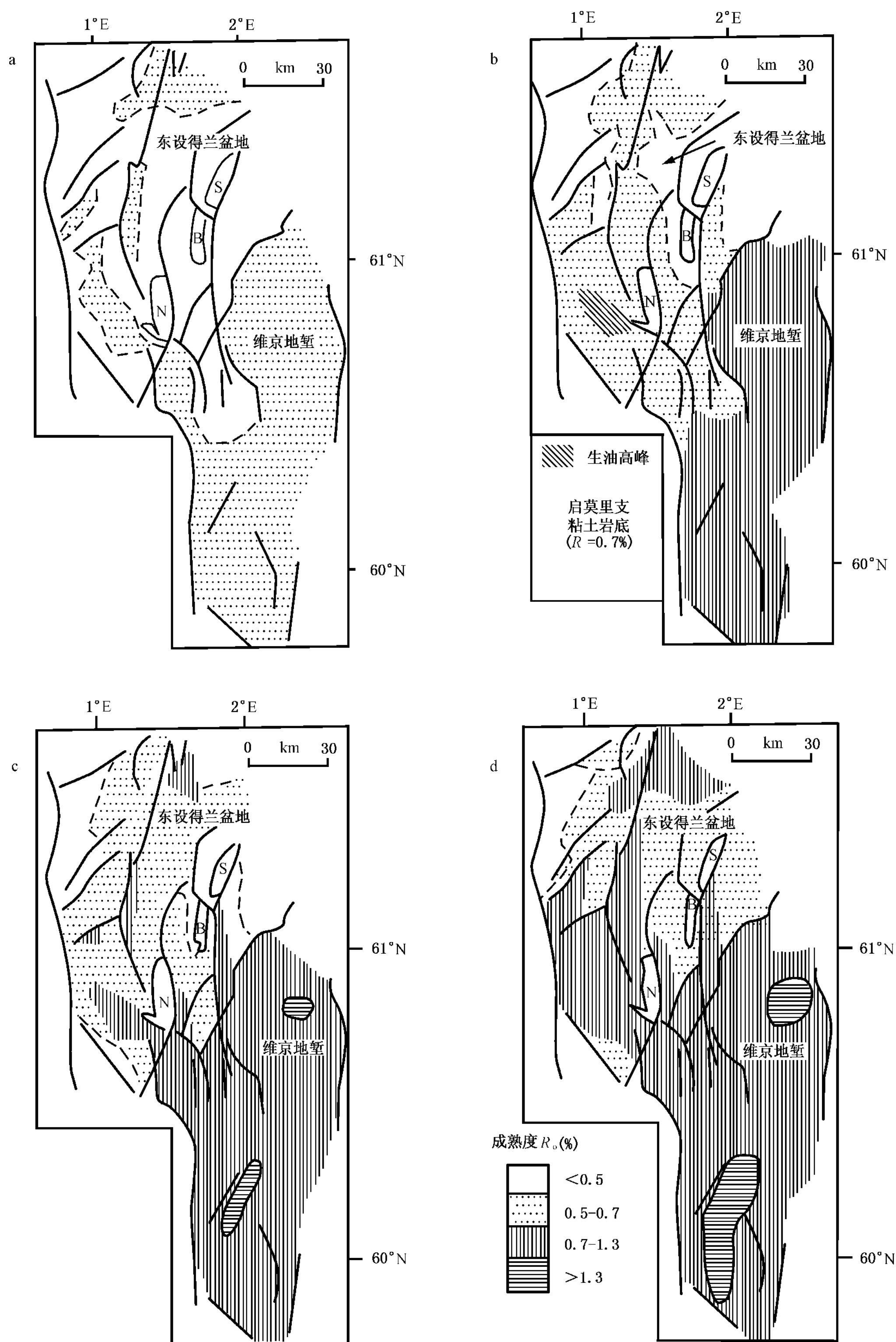


图 4—21　东设得兰盆地—维京地堑区启莫里阶粘土岩组不同时间的成熟度

a—65Ma **前**；b—40Ma **前**；c—20Ma **前**；d—**现在**

证实白垩系顶面的埋深只在中央地堑内才位于3000m以下。而且古新统页岩含有机质不多，能生成凝析油和气的数量有限，大部分地区尚处于埋深浅、未成熟的阶段。有人曾提出古新统可作为阿盖尔油田的油源岩，然而，根据埋深及区域性成熟度和干酪根类型来看，这是不可能的。国家湾地区古新统罗格兰(Rogaland)组的总有机碳平均值为0.43%，而挪威石油勘探公司在埃科菲斯克地区的2/4—12钻井内的两段古新统岩层中的总有机碳达1.8%和2.0%(在井深3030～3070m处取样结果)。古新统页岩的成熟度达0.59%～0.62%。由于这是该地区古新统埋深最大的位置，因此预测这个岩组不含有价值的凝析油和气的生成作用。

北纬度62°以北的第三系，在埋深足够大的地区可能有相当数量的油气生成。在斯匹次卑尔根群岛的古新统和始新统中的煤层，其生气作用仍处在未成熟阶段(镜质组反射率为0.4%～0.7%)，但这两个统中都含有大量非晶质干酪根的黑色海相页岩夹层，在适当条件下是完全可以成为油气源岩的。

第三节　北北海地区的烃类特征

来源于启莫里阶粘土岩组的代表性石油是一种低硫、中等密度的环烷—石蜡族石油(表4—7)。Aalund等人(1983)已把北海各种石油的成分进行了汇编，但天然气的资料很少。北北海石油和天然气的某些主要特征都归纳在表4—7和表4—8中，贝格尔(Bergt)湾、威其格朗德地堑和中央地堑等地区(图4—22)，除了产无硫的中等密度的石油外，还产凝析油。

表4—7　启莫里阶粘土岩组生成的北海石油的各种特征平均值

特　　征	范　　围	平均值(±标准差)	说　　明
API(°)(1)	17～51	36(±6.5)	脱气原油
硫含量/%，(a)(2)	0.13～0.55	0.32(±0.12)	15个油样，不包括下面的(b)项
硫含量/%，(b)(2)	0.56～1.57	1.0	皮帕、克莱莫、塔坦、布坎
气/油比，1000ft^3/bbl(3)	2.16～1547	671(±415)	分析的多相的样品
气/油比，1000ft^3/bbl(3)	216～952	562(±271)	不包括埃科菲斯克
沥青质/%(1)	0.1～5.1	1.2(±1.2)	不包括达35%富沥青的石油
饱和烃/芳香烃	0.62～8.0	2.02(±1.2)	脱氢石油
姥鲛烷/nC_{17}比	0.3～1.0	0.63(±0.17)	不包括生物降解的石油
植烷/nC_{18}比	0.2～1.1	0.56(±0.18)	不包括生物降解的石油
姥鲛烷/植烷比	0.6～1.9	1.24(±0.25)	不包括生物降解的石油
$\delta^{13}C$/‰(4)	－2.84～－29.8		布雷、斯塔提夫约得－马里等的石油，皮帕地区的石油
V/Ni(10^{-6}重量)(2) V	0.53～6.0	3.1(±1.9)	9个油样的平均值，不包括布坎的
Ni	0.5～5.0	1.8(±1.3)	(＝26×10^{-6}V，45×10^{-6}Ni)
腊/%(a)(2)	4.0～7.7	6.3(±1.1)	5个油样
(b)(3)		17	比特里土(5)

(1)Comford等人(1983)，主要是勘探过程中地层测验器试井(PST)和RFT的样品，共作了60个样品分析；(2)Aaloud(1979，1983)开采的原油；(3)从Illing和Hobson(1981)，Woodland(1975)和Halbouty(1980)等的油田报告中摘编的；(4)Roitsema(1983)；Bissada(1983)；Fuller(1975)；(5)比特里土油田可能有另一个油源。Sd＝标准差。

表 4-8　北海及其邻区天然气的特征值

	C_1/%	C_2/%	N_2/%	CO_2/%	$\delta^{13}CH_4$/‰
英国北海南部(1)					
平均值	91.2	5.2	3.6	0.27	
范围	83.9～95.0	3.7～8.2	1.0～8.4	0.1～0.5	
格罗林根	81.6	2.7	14.8	0.9	−36.6
金塞尔头(2)	99.1	0.2	0.4	0.3	−45.5～−48.3
莫康比(3)	**干气**		7.8	**不定**	
斯莱普勒(4)	78～80	12～16		7～9	
弗里格(5)	95.5	3.6	0.4	0.3	−43.3
挪威勘探公司 31/2 **区块**(6)	92.6	5.4	1.5	0.5	
德国西北部(7)	59～91	8～30	1		−54～−44
荷兰瓦登泽(8)	77.1～88.7	287～6.4	31～19.7	1.26	
大十四(K/13)(9)	85.3	6.7	5.4,7.1	1.7,0.1	

(1)Barnard **和** Cooper,1983;(2)Colley **等人**(1981);(3)Ebbern,1981;(4)Larsen **和** Jaarvik,1981(C_2^+**的数据中包括** $3N_2$);(5)Heritier **等人**,1981;(6)Berkke **等人**,1981;(7)Tissot **和** Bessereau,1982(**侏罗系至下白垩统的气源**);(8)Cottencon **等人**,1975;Van deu Bosch,1983;(9)Roos **和** Smits,1983(**经再运移的威斯特伐利亚阶的天然气**)。

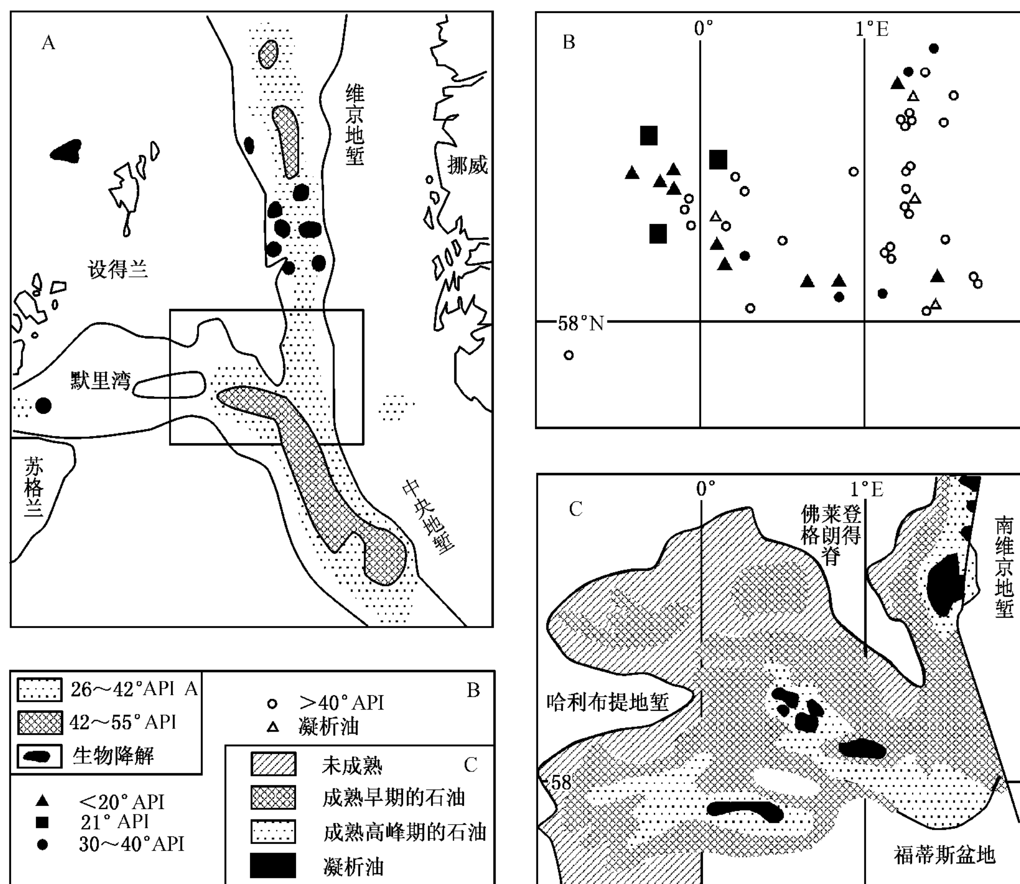


图 4−22　**石油类型概况图**

A—**按** API **划分北海各类型石油的分布**;B—**按密度细分石油分布**(a **图内的嵌图范围**);

C—**干酪根类型和成熟度预测**,**威其格朗德地堑的烃类生成物**

北北海大多数地区发现的重油（API<20），一般都在现今地温小于60℃储集层中（按30℃/km计，深度为2000m以内）即在第三系岩层中。有证据表明，储集层产出的重油都是启莫里阶粘土岩组生成的正常石油经细菌降解作用而成。细菌对储集层石油的降解作用，现今用原油的分子和同位素组分就容易鉴别。北海重油尚未进行商业性生产。中等密度的石油（API为20°～35°），据了解目前是产自设得兰西部的克莱尔油田（API为22°～25°），有人认为北北海地区内中等密度的石油为生物降解的石油，其API在28°～35°范围，这和Cornford等人（1983）提供的分析资料一致。

在威其格朗德地堑的几个油田中，有含硫较高的石油（例如派普尔、克莱莫尔、Tartan和Buchan等油田）。比阿特里斯油田，虽产轻质无硫原油（API 38°），但是蜡含量高（17%）、凝固点高（65℉；18℃），气油比低。赖斯韦克含油区的Pelier油田产出的也是含蜡量高（16%）、低硫（0.3%）、API为35°的低油气比的石油。上述两油田的石油，据有关资料分析可能是来自非海相的源岩。

在北北海盆地中发现大量轻质油和凝析油。一般认为这些烃类是由海相油源岩产出，它们的镜质组反射率（R_o）为1%～2%，具有较高的热成熟度。凝析油生成的主要带出现在"石油窗"之下，这里的温度和压力是适合生成石油的。而凝析油生成带之下，生成烃类的最后产物——干气。

还有人根据加拿大西北波弗特—马定些盆地的凝析油情况，提出了由低成熟度陆相油源岩生成凝析油的一种模式。

为了查明这两种模式对北北海盆地的适应性，分析研究了该区的石油（20°～50°API）和凝析油的分布。为验证凝析油生成模式的地质控制因素，对北海北部主要的油源岩启莫里阶粘土岩的地层参数作了研究。如油层埋深、热成熟度以及有机质（干酪根）类型等参数研究。因这些参数是控制生烃的主要因素。

发现凝析油的分布明显地受北北海地堑构造控制。根据所报导的石油和凝析油的发现资料，绘出了北北海盆地的凝析油，API的地理分布。其中采用了150多个资料点（图4—22）。在主要的地堑或盆地内轻质油和凝析油与盆地较深部位具有明显的对应关系。但有一个例外，挪威大陆架特罗尔（Troll）地区的轻质油，其分布却远离维京地堑，而重质油是沿地堑翼部聚集的。

从上面那些石油API重度分布可以清楚地看到凝析油与北北海地堑的较深部分的密切关系。但挪威的31/2区块特罗尔油田情况很特殊。必须注意这种分布是指储集层中烃类的分布，而不是指油源岩的分布。运移作用在盆地中是微不足道的，但可以假定石油API的分布相当于油源岩分布的位置。

凝析气的生成"窗"在北海北部位于4500m和5400m之间，这表明在盆地中心，目前仍在生成凝析油。凝析油生成带和API的分布对比表明凝析油和启莫里阶粘土岩埋深达4000m以上的地区有着非常密切的关系。

第五章　北北海盆地的油气运移

北北海盆地的油气运移研究限于资料，目前仅能从局部地区的研究成果中加以归纳综合。但由于油气运移问题非常复杂，涉及的问题广泛，而且无法直接进行观察和测试，因而增加了对这个问题的研究难度。目前还远未取得令人信服的成果。虽然如此，人们对油气运移的重要性是逐步明确了。尽管对油气运移机制多少年来一直无明显进展，可是已认识到油气运移是贯穿于油气生成、聚集和散失这一自然发展过程的始终的。运移作用对油气的散失和破坏是绝对的，而保存和聚集是相对的有条件的。因而，在北北海盆地中人们也从各自不同的角度，从不同工区出发，对油气运移问题提出了一些看法，现分述如下。

第一节　中央地堑区油气运移的讨论

该区的流体运移，以维京地堑、中央地堑等地油气运移为例加以说明。当油源岩被确定时，它的分布范围和有机质成熟度就可确定，并可利用地化指纹技术识别出主要的流体通道及确定伴随的流体压力。异常的孔隙流体压力的出现标志着流体运动的迟缓，在静水压力为主的地方，石油和天然气，进入含水系统，在浮力作用下推测表现为自由运动。在这样的条件下，可观察到长距离的侧向运移，油气可被带离源区 32km 的地方，当在异常孔隙压力增加的情况下，形成一个封闭或局限的系统，侧向流体运动被封闭边界所限定，这样的状态有利于垂向运移，它为高的流体压力所驱动。

根据上述模式，对中央地堑等地前白垩纪和早第三纪储集层中水、石油和天然气的分布与源岩成熟度图做了比较，得出了油气运移的许多结论对该地堑区来说是独特的，但其原理对于其他地方也是完全可以适用的。

根据现有资料，目前仅能对侏罗纪及其更新世地层中的油气运移问题作些阐明和讨论。中侏罗统 Pentland 组中含不连续煤层厚度一般小于 1m，个别地方厚达 9m，平均 TOC 为 4%，属重要的成气源岩，埋藏深度均超过 4900m，已达到成气的成熟期，温度已达到 350℉（177℃）。

晚侏罗世海侵沉积以富尔马组砂岩为代表其中很少夹泥岩或页岩，因而构成源岩的可能性很小。在远离粗碎屑沉积的地方沉积了以泥岩为主的希瑟（Heathe）组，含有 TOC 平均为 3%，主要由易于成气的腐殖有机物组成。当局部厚度超过 914m，希瑟泥岩组就成为重要的源岩，但其成熟度与中侏罗统基本一致。启莫里阶粘土岩组以有机质的突然增加为标志，TOC 达 15%左右，平均为 8%，以非晶质海相干酪根为主。

上侏罗统页岩等厚图（图 5－1）是以已有的钻井和地震资料为依据做出的，这些页岩向盆地中心快速增厚，其沉积受生长断层的控制。沉积最厚的地方见于东甘尼特（Gannet）海槽和中央海槽，其他大部分地区厚度为 0～60m。在白垩系和更年轻的岩石内，没有识别出有意义的油气源岩。取自中央地堑的 22 个原油样品分析结果表明其源岩相同，均来自启莫里阶粘土岩组。

由于晚侏罗统源岩直接覆于富尔马储集层之上，运移至有效的储集层应该是易于预测和明确的，然而，一系列因素使得这个简单的模式复杂化了。

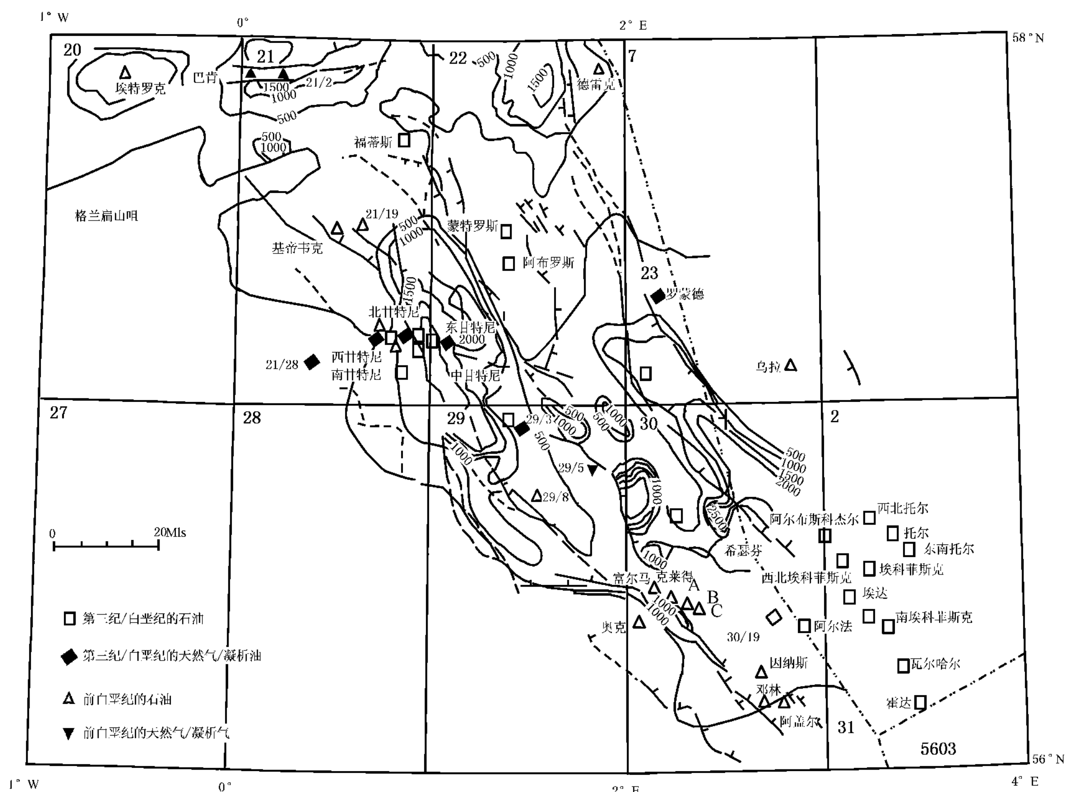


图 5－1 上侏罗统页岩等厚图(启莫里阶粘土岩组＋希瑟组)(单位:ft)

富尔马砂岩的不连续性,限制了侧向运移的有效性。在整个盆地中该储集层受到较强的构造和断裂作用,形成了良好的基底封闭层和高异常孔隙压力的保存。在地堑深处压力梯度超过表面 0.8psi/ft 的超压,如果对一给定的深度计算正常的大气压,从测出的压力值减去该值,即为剩余地层压力,可用下列公式来计算:

$$剩余地层压力 = P - (Z \times 0.45)$$

式中 P——测量的地层压力,psi❶;

Z——海底深度,ft;

0.45——相对于地面的压力梯度,psi/ft。

这种压力从所有可利用的测井曲线和生产测试资料来确定,整个中央地堑都可圈出来(图 5－2)。可以看到从地堑西部边缘朝东移动地区快速增大,可以观察到地层压力超过 140000psi,产生剩余地层压力达 80000psi 以上,这明显地表示侏罗系地层是一"封闭"系统,使油气运移速度减慢,出现了异常现象。第三纪运动形成的底辟盐穹隆周缘,侏罗系压力比区域平均值低一些,可能是由于出现局部压力"泄漏"的原因。由于顶部盖层质量差,就更利于流体作垂向运动运移,这就改善了这类构造在白垩层和第三系岩层中油气的远景。

在中央地堑区内,大部分储集油气的侏罗系地层中,运移是一个局部置换过程,但在地堑深处排泄区范围是大的(平均 260km²),而在地堑边缘较为有限(平均 65km²),然而,对这种高质量的油气源岩产出足够的油气是不成问题的。

❶注:1psi＝6.89kPa,1ft＝0.3048m。

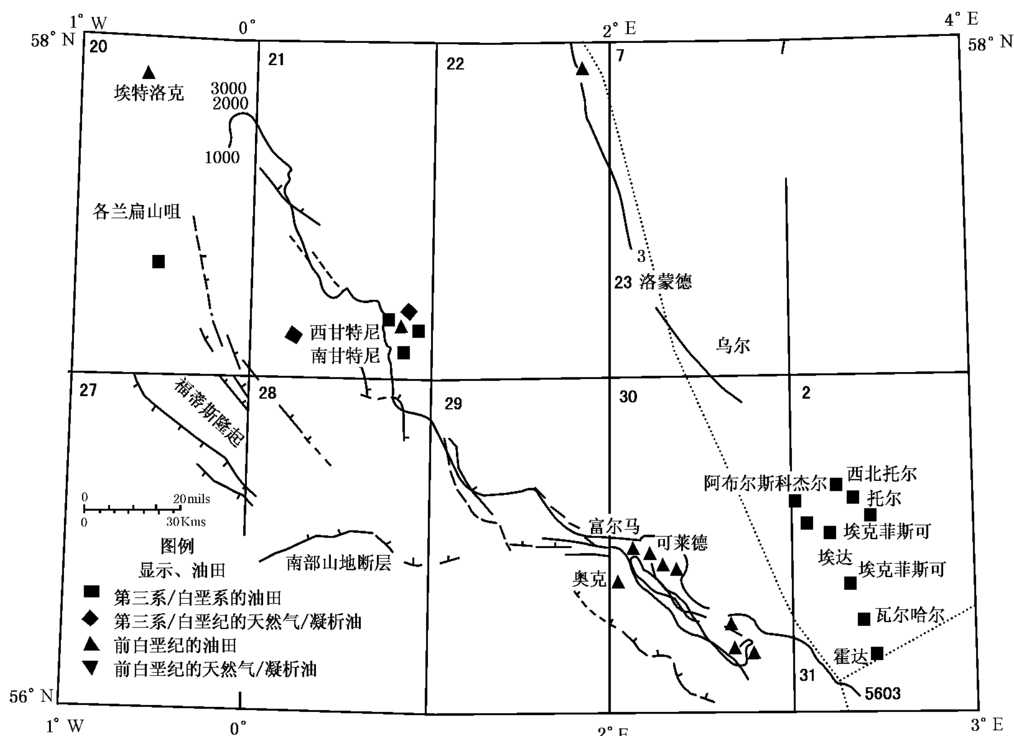


图 5—2　上侏罗统剩余地层压力图(单位:psi)

将油气分布与成熟度图对比后发现,欲在中央地堑区内侏罗系勘探层内取得成功就需要将圈闭与成熟源岩的形成时期紧密结合起来加以研究。从已知的钻井统计资料表明,不仅成熟区外运移风险大大增加,而且在干气区内钻遇石油的机会也是小的,在成熟和过成熟区内由于封盖差,钻过的大多数为干油井,这种情况与北维京地堑侏罗系油气运移完全不同,那里没有盐穿刺,而有相当多的储集层及简单的构造,例如特洛尔的天然气是从 16km 外的源岩区运移来的。

在中央地堑,启莫里阶粘土岩中生成的油气随溶液由生油基质的微孔隙扩散到泥岩中的大孔隙之后,CO_2 逃逸出,并形成了多相系统,经由这些大孔隙及裂缝运移出生油岩——初次运移,并继续向储集层运移。

尽管该区所有的油气都形成于侏罗纪并沿地堑边界的主要断层作垂向运移,但是一旦它们运移进入下第三系砂岩储集层中,长距离的侧向运移就成为可能。资料表明,不但油气清楚地表现为具有垂向运移的特征,而且来自第三系砂岩的地层水为盐饱和水,表明与蔡希斯坦统有关的地层水,也具垂向运移的特点。侏罗系石油来自邻近的源区,显示短距离运移的特征。

已有资料表明,盐的底辟运动可导致垂向运移的发生,在白垩储集层中的油气聚集就表现得特别明显,因为盐的底辟可使下白垩统封闭层产生许多裂隙,形成油气垂向运移的通道。图 5—3 表示通过30/19 区块上小型白垩聚集区的地震剖面,这儿一般具数个白垩油田,天然气的垂向运移形成了地震“柱状体”。这是天然气沿张裂隙渗透到中新世泥岩中,从而引起声速降低和射线路径弯曲。事实上,可从海底渗出的天然气来检测这种聚集体。在大多数情况下,这种储集层内极少有流动的石油被保存下来。

对于侏罗系油气形成和运移问题,目前的主要认识是,油气主要来源于启莫里阶粘土岩

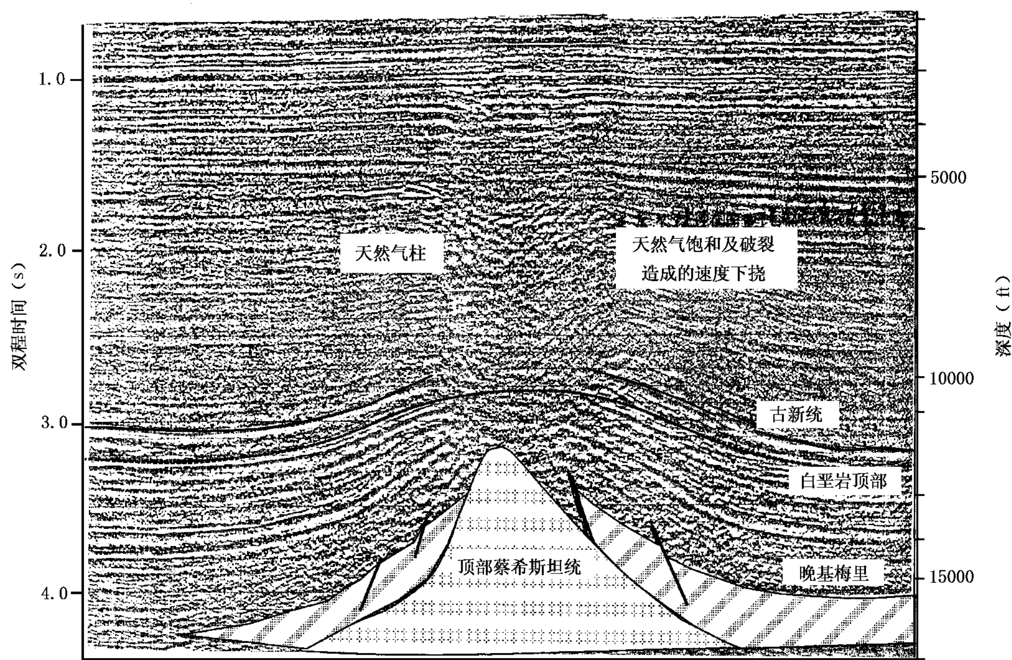


图 5－3　通过 30/19 区块的地震反射剖面

组，由于它的广布才形成了较大范围的油气聚集；地堑边缘远景区的排泄面积平均为 65km²，在地堑深处为 260km²，在成熟区，启莫里阶粘土源岩中产生的油气超过圈闭容量，在侏罗系内油气运移非常有限，反映在侏罗系异常压力的分布上，从而形成了流体运移的障碍；因而表现在某些异常压力非常高的地区，垂向运移比侧向运移更明显。基于上述条件，侏罗系储集的油气还没有发现沿启莫里阶成熟源岩区倾向距离有超过 8km 的。基于同样的原因，在油气已达过成熟的区域中发现侏罗系储集层石油可能性也很小。目前已知侏罗系地层到油窗的平均深度是 2990m，到湿气/凝析油窗为 3960m，而到干气则为 4660m。

第三纪和白垩纪地层，在中央地堑内没有见到有意义的成熟油源岩，第三系碎屑储集层遭受变形的程度很小，代表一种侧向连续正常压力的含水系统。已有资料表明，第三系地层中油气具有长距离侧向运移的特征，石油运移达 24km 以上，天然气运移达 32km 以上；接近第三纪底砂岩常有通向基底的地堑边界断层出现（这里的白垩系遭受微裂隙化，断层成为弯曲的枢纽线，这使其成为油气的通道）；底辟作用形成白垩系裂隙网络，使得来自侏罗系的油气垂向运移，但由于背斜和穹隆之外缺乏裂隙网络，因而在白垩系储集层中侧向运移特征消失。

第二节　挪威海域奥塞贝格地区的油气生成及运移

挪威大陆架的奥塞贝格地区位于霍达地台的西部边缘，研究表明，该区的主要油气源岩应为维京群的上侏罗统页岩，主要的储集岩系为其下伏的布伦特群。

油气生成量可用下列方程加以计算。即：

$$HC = \mathrm{TOC} \times F(II) \times TR \times h \times 2.5 \times 10$$

式中　TOC——总有机碳含量；

F(Ⅱ)——Ⅱ型干酪根的馏分类型；

TR——转化率；

h——油气源岩的厚度；

2.5——页岩的密度；

HC——生油量。

运用给出的这一方程，即可计算任一时间间隔的石油形成值，而类似的方程也用作计算天然气的数量。石油生成量的计算要求知道不同干酪根类型的相对数量以及据此作出的有机碳和有机相分布的区域特征。根据这些资料预测的总生油量才比较可靠，而有一定的意义。

油气二次运移是在具有上升潜能（地下地形）、上浮力、毛细管压力及流体动力的各种复杂条件下发生的。结合对该区域演化的估计可得出表示于图5－4的主要运移路线。它表明在奥塞贝格区域阿尔法构造中的石油可能来自西部的维京地堑，而出现于贝塔南部构造(30/6－5)的石油则可能主要来自北部的霍达/韦勒弗里克地堑。为了查明这种可能性，主要应用生物标志物和稳定碳同位素分布法进行油—源对比研究。

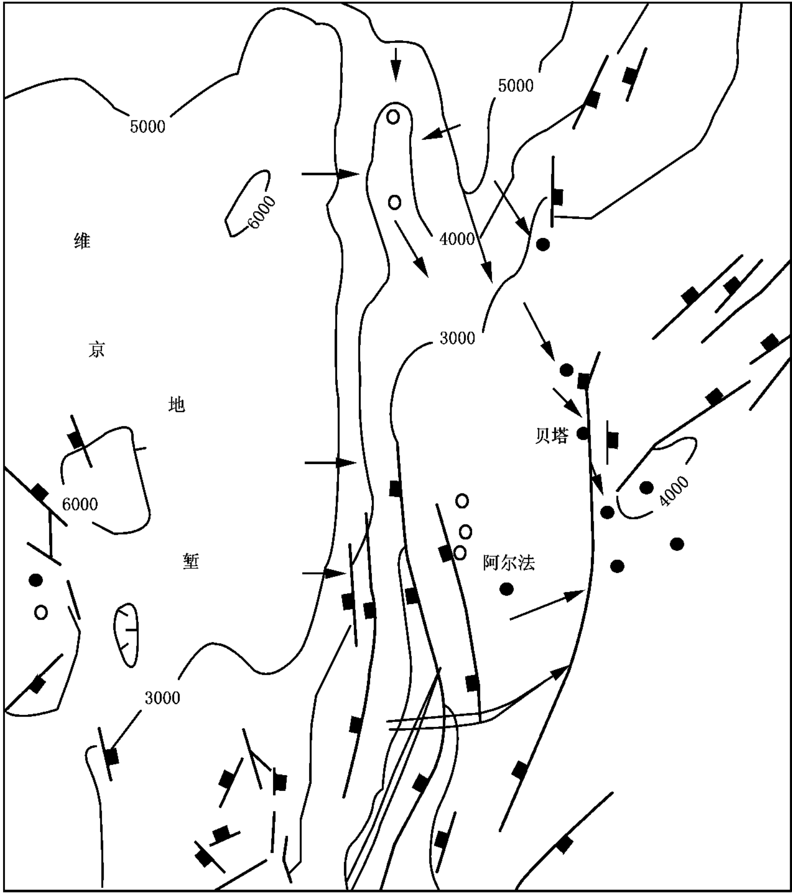


图5－4　研究区内油气运移的路线示意图(单位：ft)

图5－5显示奥塞贝格地区中阿尔法及贝塔南部构造中(30/6－5)原油的甾烷和三萜烷的分布。尽管它们相当类似，但是还有几处不同，在应用多元统计处理之后这种差别就更为明显。然而，因为两种原油都含有C_{28}双降荷烷，其为典型的来自维京群页岩的北海石油，所以认为它们有成因的联系。两种石油馏分碳同位素组合也十分相近，这就近一步支持了其原油的源岩具相似性特征的提法。

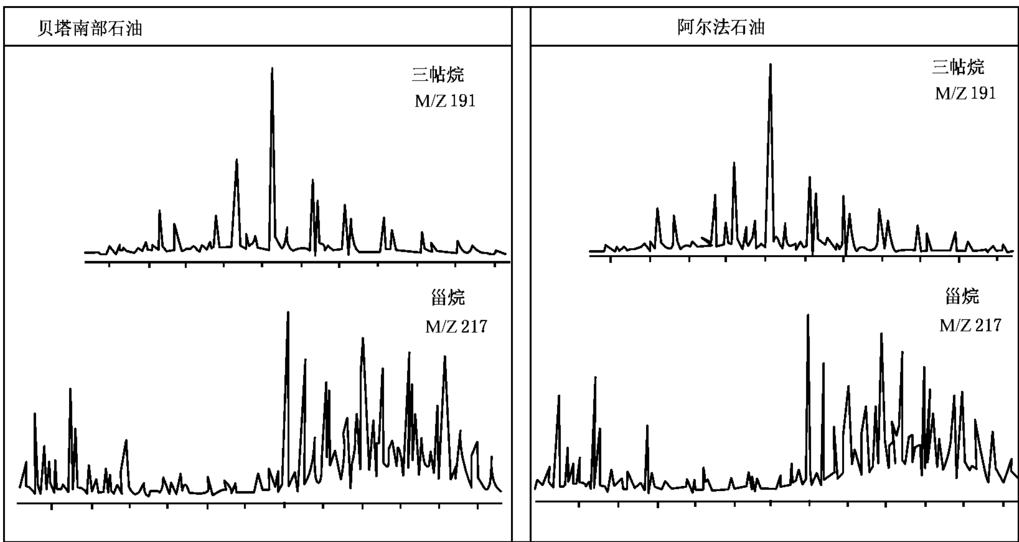


图 5—5　奥塞贝格地区石油中的生物标志物

大量的生物标识物特征说明该区的石油具有多种来源的提法，也是有一定根据的。

研究表明，在晚白垩世马斯特里赫特期主要油源岩区的生油气量相当大。然而古构造研究却显示在那时奥塞贝格阿尔法地区沉积盖层仅有 20～30m 厚，但在贝塔南部构造 30/0—5 地区则形成了厚达 1000m 的沉积。这表明在阿尔法构造有效盖层形成之前，在贝塔南部构造中已出现石油的聚集，这与该区地化研究成果相吻合。

已有研究资料认为，如果奥塞贝格地区阿尔法构造在大量石油运移时还是很浅的话，那么在原油运移通过该构造或穿过它的储集层时，就可能表现出具生物降解的特征。通过进一步深入研究说明，在白垩系盖层岩石多孔层段中确实有高度生物降解的石油。这就证明了该构造在形成有效盖层及大规模聚集之前存在着早期生物降解石油。碳同位素组分的某些比值也反映了在阿尔法构造中这种早期生物降解的踪迹。它几乎为后期进入的非降解原油所掩盖。上述事实说明，奥塞贝格地区的石油来源于两个源岩区（即维京地堑和霍达/韦勒弗里克地堑），而且大量石油的早期运移是通过阿尔法构造进行的。

第三节　维京地堑的油气生成和运移

一些研究人员认为，维京地堑区是研究石油形成和运移过程的具有代表性的、并可进行合理重建的典型地区之一。

油气运移的主要原因是由于沉积物逐步埋藏导致的压实作用引起的。这种随着压实作用使沉积物发生的变化，称作有效应力，它为源岩的固体组分所承受，而另一部分压力则由流体所承受。根据 Durand(1983)对油气运移的看法，是依据相对渗透率的概率扩展的符合多相流体的达西定律。将达西定律运用到非常慢的单相流体可以是确切的，这种扩展到多相流体的公式，事实上在理论上还没有得到证明，仅能看成是实用的公式。水和油气的运动能力取决于它们的相对饱和程度，特别是在大的时间跨度对相对渗透率的这种看法不能令人满意。

油气相和水相中的压力假设由毛细管作用方程来连接。

有效应力的定律用于表示固体基质和流体之间的应力。这样，对每一选定的长度，在单位时间里就可以计算固体可能支撑的负载（其取决于沉积物的孔隙度），可以用差减法计算。当压力超过总地静压力负载给定的比率时，应考虑增加岩石渗透率的动力裂隙。可以预测多孔岩石当压力增加时裂隙的打开，以及当压力下降时裂隙关闭的情况。

维京地堑在二叠纪（？）—中生代时期走向主要近南北方向，它覆盖在加里东基底之上，其后，为厚厚的、平缓倾斜的白垩纪和第三纪层序所充填。

侏罗纪时以海平面的全面上升为特征，伴随着受断层控制的差异沉降，结束了三叠纪时期的大陆沉积，开始沉积了厚的砂质层序（斯塔特夫约尔法组）和其上覆的海相页岩——都林群。中侏罗世开始，维京地堑北部提供碎屑物质，导致了布伦特群以砂岩为主的三角洲沉积。由于海平面持续上升，使布伦特三角洲逐步沉没。广海条件导致了厌氧海水的出现，形成了启莫里阶粘土岩组的沉积（挪威地区称作 Oraupne 组）。在地堑沉降区的深处沉积很厚的页岩。

该区的赫塞尔和启莫里阶粘土岩组（亨伯群）的页岩是良好的油源岩，启莫里阶粘土组上部有机质最丰富，有机质特征在垂向的变化是上部以含Ⅱ型干酪根为主，下部由Ⅲ型干酪根组成。而布伦特煤层在该区石油的形成和聚集中也起过作用（Goff，1985）。

较成熟的亨伯群而岩，其产状主要与油源成熟度密切相关。启莫里阶粘土岩出现在维京地堑深成熟区的最有利相带中，其运移路经及荷载情况主要受当时的构造控制。

维京地堑边界断层区以陡倾斜为特征。大量次级断层形成了白垩纪以前地层侧向的不连续性（图 5—6），造就了不同区块的不同渗透率特征。斯坦特福约尔德和布伦特砂岩被认为是高渗透性的，都林、赫塞尔和启莫里组为不透水的粘土岩，主要断层以低渗透率单元为其特征，油气通过可渗透单元（布伦特和斯坦特福约尔德砂岩）表现其运移方面的总趋势和特征。

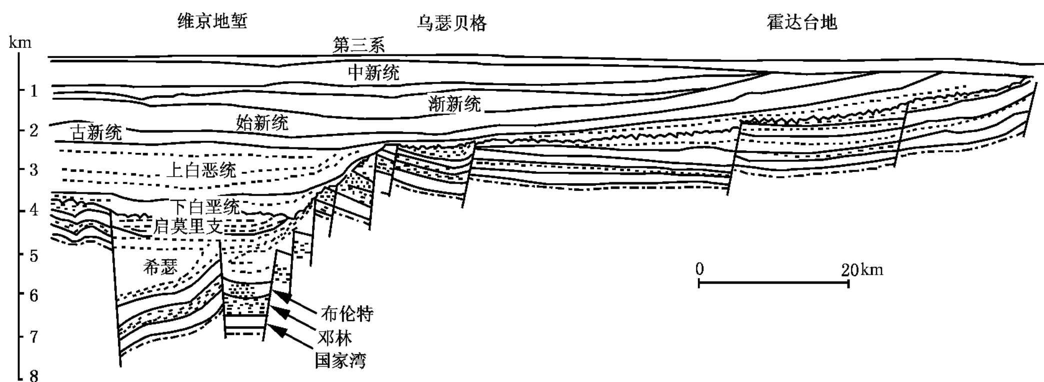


图 5—6　维京地堑区大量断层形成地层界线的不连续剖面

维京地堑的热梯度成侧向变化，从西到东逐步增加，从地堑内的 30℃/km 到霍达台地的 50℃/km。维京地堑在布伦特砂岩顶部还存在重要的超压情况。地堑内超压状态和沉积物的压实，以及与断层形成的不渗透或微渗透的结果有关。而出现在台地上为正常压力状态则是由于次要断层不起阻隔作用，允许流体连续通过侏罗系砂岩的结果。超压是动力裂隙的函数，布伦特组压力超过总沉积负载的 75%。

已有勘探结果表明，各油田中的油气主要是从地堑内运移而来的。特别是侏罗系储集层的压力状态在地堑内为高压，霍达台地为正常压力，是该区极其明显的特征。这对于地堑油气的生成、聚集和运移问题的研究都是极其重要的，也是真实、客观的对该区做出地质解释不可缺少的重要条件之一。

第四节　中北海区(英属海域)启莫里阶粘土岩组中石油的排出

对于石油形成和运动的了解,有利于在钻探之前提高预测圈闭中石油的体积和组成。

对于初次运移,即产生的石油如何从它的源岩中排出的,直至今日仍然是一个带有疑问的重要领域。对初次运移的主要机理,目前认为应以源岩中不连续石油阶段的压力驱动流为主,而石油分子通过岩石扩散能够大大地干扰石油排出和石油流体的组成。

启莫里阶粘土岩组已确切地证明是区域性源岩(例如 Carnford 等,1984;Reitsema,1983)。该层序在区域上平均以 30～40m/Ma 的速度被连续埋藏。

Cooles 等(1986)提出大部分石油和原始气的形成,在 100～150℃已出现,并伴随着从源岩中排出,在大约 120℃时,石油的产出最为活跃、意义最大。

区域上,启莫里阶粘土最大温度小于 100℃,显示初期平均氢指数为 570mg/g,平均 TSES(可溶抽提物总量)为 30mg/gTOC,应用这些数字和 Cooles 等(1986)的代数表达式,就可以计算:

(1)最初的热解产物(S_2);

(2)最初的 TOC 值(TOC);

(3)石油的生成指数(PGI),该指数可表述如下:

$$PGI=\frac{\text{产生的石油}+\text{最初的石油}}{\text{最初的石油潜能}}$$

(4)排出的石油数量,表示为石油扩散系数(PEE),该系数可表述如下:

$$PEE=\frac{\text{排出的石油}}{\text{产生的石油}+\text{最初的石油}}$$

计算结果(假设没有有机质类型的系统变化)显示出 S_2 和 TOC 一般在岩石中变化范围分别在 20～60kg/t 和 2～10 重量百分比。

PGI 和 PEE 一般随深度(即温度)增加而变大。计算出的最大石油扩散系数(>0.5)只出现在深度大于 4030m 的地方,那儿 PGI 也超过了 0.5。这可能与埋深超过 4030m 的启莫里阶粘土排出的流体有关,事实也是如此。表 5－1 提出了两个分子参数,说明随成熟度升高而增大的甾烷分布。

表 5－1　甾烷对布雷石油与启莫里阶粘土组泥岩对比

分子(m)	分子测定(1) 20S/20R＋20S(2)	ββ/αα＋ββ(3)
石油	3915	3967
4156	0.58	0.51
0.57	0.59	0.68
0.54	0.51	0.69

(1)用气相色谱—质谱测定;

(2)20R/(20R＋20S)－5α(H)14α(H),17α(H)－24－乙基胆甾烷;

(3)5α(H),14β(H),17β(H)/52α(H),14β(H),17β(H)＋5α(H),14α(H),17α(H)－24－乙基胆甾烷。

总之，基本地化测试结果证明在 3930～4170m(110～120℃)间的启莫里阶粘土组正处于产排油的活跃期。扩散系数大于 50%者仅出现在深度大于 4030m 以下的地方。这与 Cooles 等(1986)提出的源岩特征模式一致。

为了调查石油扩散的效果和化学特征。选择了两个靠近砂岩的厚泥岩边缘的样品和 13 个厚度小于 1m 且与砂岩互层的泥岩样品进行分析研究(表 5—2)。

表 5—2　两井中薄泥岩的分析研究结果

井号	深度/m	厚度/cm	孔隙度/%	平均孔隙半径/nm	TSE/(mg/gTOC)	$n-C_5$ /(μg/gTOC)	$a-C_{10}$ /(μg/gTOC)	$1-C_{15}$ (μg/gTOC)	$n-C_{20}$ (μg/gTOC)
1	4071.6	10	2.4	3.2	27	429	83	12	6
	4072.00	5			31	296	110	44	18
	4088.2	20			38	347	110	22	11
	4088.5	10	2.4	3.4	34	383	119	23	11
2	4067.5	20			43	801	155	66	32
	4072.2	40			34	844	102	32	15
	4076.0	5			59	966	257	102	55
	4076.7	40			35	1059	128	44	26
	4077.3	60			36	975	109	46	23
	4112.3	<5			49	925	228	102	62
	4112.4	<5			42	990	182	94	60
	4126.8	25			41	1128	199	47	31
	4127.6	40			28	975	118	96	81
标准样(厚泥岩中心)									
1	4020		2.9	4.5	183	52	390	691	472

厚泥岩总可溶提抽物资料表明，从泥岩中部到其边缘有机质等有关产物减少。在距泥岩边缘 5m 范围内 TSE 比泥岩中部减小三分之一，而有的甚至出现 TSE 在泥岩中部是边缘的两倍的情况。通过不同地区，同一泥岩的源岩中取得的实际资料即可计算得出该层的石油排出率，这是采用不成熟样品及 Cooles 等(1986)的方法做出的。一般来说，在泥岩/砂岩界面 5m 范围内所计算的排出率可以从 30%升到 80%。当在泥岩中心排出率高达 80%时，则在边缘将上升为 90%或更高。

薄泥岩中心相对于较厚泥岩段中心显示出排出量较大的特点，因而其一般比厚泥岩中心典型值低了 6 倍(见表 5—2)。

实际资料表明 TSE(可溶抽提物总量)资料揭示的运移效果是随分子组分而变化的。

TSE 浓度说明薄泥岩较之厚泥岩中心排出更多，特别是重于 C_9 的组分显示出排出率更为增强的特征。但是厚泥岩边缘和薄泥岩都富集有 C_{5-8} 组分或具有厚泥岩中心相似的浓度。这说明对于 C_{5-8} 烃类较之 C_9 及其以上组分较少从油源岩中排出。与邻近的泥岩相比，在 0.6cm 厚砂岩纹层中即使有机碳浓度相当高时，也仅仅观察到碳原子数大于 C_{12} 的组分，这也说明于 C_{12} 的烃类似乎排出较少。也就是说 C_5～C_{12} 的烃类保存在源岩中较少，排出的较多。

当大量石油排出的时候，那时源岩肯定已达到临界石油饱和度。当知其深度和 PGI(石油

生成指数)、PEE(石油扩散系数)及原始热解产物(S_1)时,即可计算出:

排出的石油[(PGI)(PEE)(S_1)]为 19kg/t 和源岩中还剩余的石油[(PGI)(1－PEE)(S_1)]的 4.8kg/t。

假定典型的石油密度为 600kg/m^3(Egland 等,1987),典型的源岩密度为 2400kg/m^3,每吨岩石含 4.8kg 石油相当于占体积的大约 2%,该值接近所测的源岩孔隙度 2%～3%之值。因此可知,在出现大量石油排出之前,源岩需要几乎完全被饱和。这恰好与 Cooles 等人提出的,原始 S_2 产物少于 5kg/t 的源岩是不可能有石油排出的论点相一致。

在厚泥岩中,距边缘大约 5m 的范围及薄泥岩中石油的排出效率最高。这主要是由于毛细管作用,在非湿润阶段形成两种流体相的超压。它被称作毛细压力(P_c),可由下列式子表示。

$$P_c = \frac{2\gamma\cos\theta}{r}$$

式中 γ——石油和水之间的表面张力;

θ——石油—水分界面与孔壁的接触角度,一般测出大约为 0～30°;

r——孔隙半径。

在水湿润体系中,当孔隙半径增加时,P_c 减小,这样在泥岩和较大孔隙砂岩的接触面上使石油源源不断从泥岩泄出进入砂岩,而其中的水将被泥岩所吸收,直至达到饱和为止。

图 5－7 和图 5－8 表明毛细管作用范围大约有 5m,不然的话,石油的流动与压实或干酪根转化为石油时的体积增大而形成的超压过程密切相关(England 等,1987)。

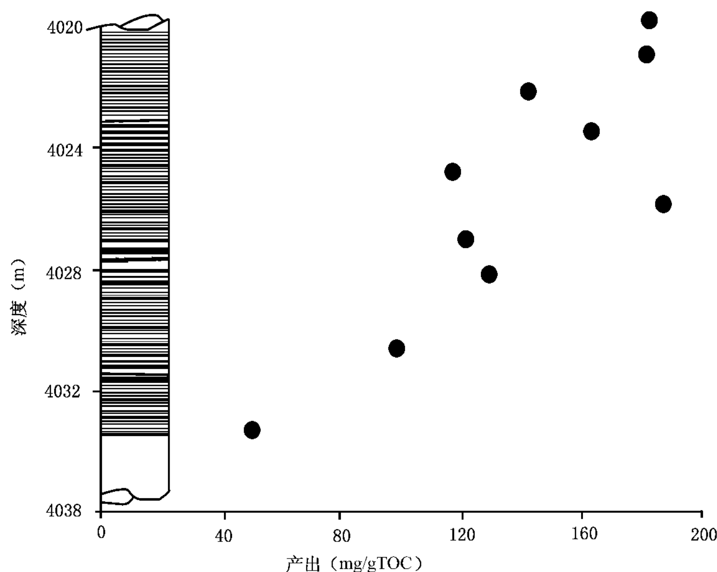


图 5－7 井 1 厚泥岩底部相对于 TOC(mg/gTOC)的总可溶抽提物产量

在一般的情况下,较小的分子扩散快一些,由于石油主要由 C_1－C_{40} 烃类组成的,由压力驱动使流体排出。因此,这些排出组分的浓度相对于总有机质数量是有重大变化的。在源岩中将是石油和干酪根的混合物,烃类相对总有机碳的浓度要低一些,最低值见于边缘。

图 5－9 的模式说明,随时间的变化源岩中石油的排出扩散情况。第一阶段,产生的石油使源岩未达饱和,扩散还没开始。当浓度升高,扩散开始时,将从源岩层中心到边缘和从源岩到砂岩的扩散流降低,如第二阶段表示的梯度。达到稳定的分子扩散,如第三阶段显示的浓度

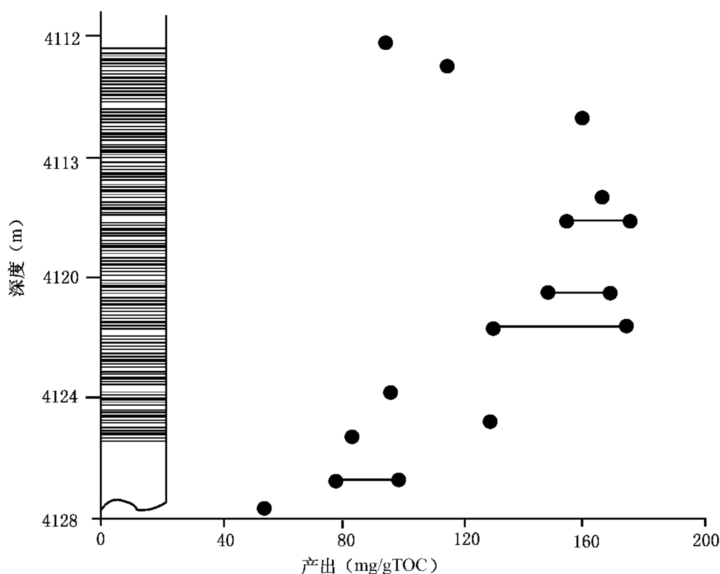


图 5－8　井 2 砂岩间厚泥岩相对于 TOC（mg/gTOC）的可溶抽提物

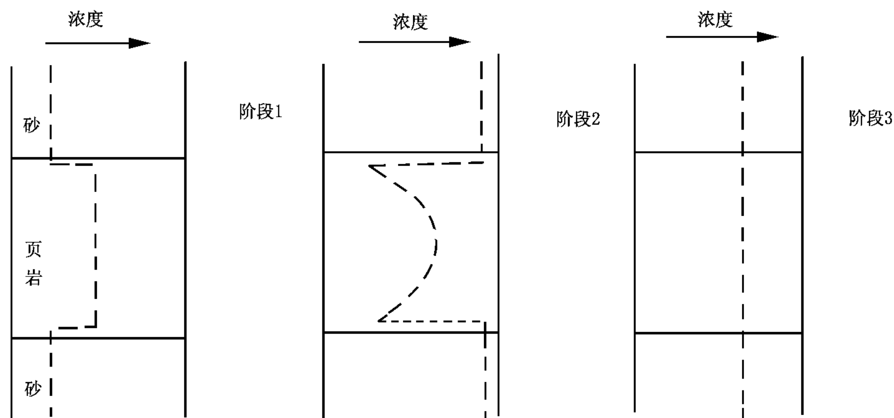


图 5－9　油—水接触面之上与储集砂岩互层的泥岩源岩，
相对于 TOC 石油分子浓度剖面随时间变化

阶段 1—干酪根转化为石油流体，但还没达到可以开始扩散的高孔隙饱和度；阶段 2—出现不连续石油阶段流活跃的扩散。石油流入砂岩，而毛细管作用使得页岩边缘出现最低的浓度。它较大的孔隙体积和较低的干酪根含量意味着砂岩较之页岩中心浓度高一些；阶段 3—分子扩散引起的石油分子的运动降低和消除了由不连续阶段流形成的浓度梯度，仅扩散能力较高的分子可以达到第三阶段

剖面，这些在厚泥岩（源岩）边缘将出现缓慢的烃类排出，而较活跃的组分排出相对较少，扩散快的分子将永远不会在第二阶段显示出浓度梯度，一旦扩散变大，它们将在第三阶段保留着一定的浓度。资料表明，只有轻于 C_9 的分子才能扩散到第三阶段。较重的组分就不能够达到上述情况。这是因为 TSE 主要由 C_{15} 组分组成，所以将恒定地显示出第二阶段的浓度梯度。

应用上述模式，发现在源岩的边缘特征是 $>C_9$ 烃类（排出的）浓度低，而 C_{5-8} 组分的扩散浓度较高。这是从已有实验中观察到的事实。

提出的石油扩散模式，对预测在压力驱动流形成的最大石油扩散作用是有着重要意义的。资料证明 C_{5-8} 组分较之 C_9^+ 组分更易作远距离扩散，可以做到定量测试这个扩散结果。

一定数量分子扩散距离(L)所用的时间(t)由下式给出：

$$t = \frac{1}{4\log C_{10}} \cdot \frac{L2}{D}$$

式中　D——扩散系数。

应用上述方程式，采用 Leythoeuser 等(1982)假定的扩散系数，计算了 $n-C_5$、$n-C_6$、$n-C_7$ 和 $n-C_{10}$ 烷烃所用的扩散时间(t)(表 5—3)。

表 5—3　部分烷烃扩散时间

组　　分	$D/(m^2/s)$	t(Ma)	
		L=1m	L=10m
$n-C_5H_{12}$	1.57×10^{-11}	2×10^{-4}	2×10^{-2}
$n-C_6H_{14}$	8.20×10^{-12}	4×10^{-4}	4×10^{-2}
$n-C_7H_{16}$	4.31×10^{-12}	7×10^{-4}	7×10^{-2}
$n-C_{10}H_{22}$	6.08×10^{-12}	5×10^{-3}	5×10^{-1}

尽管目前对 D 的估计还存在某些不确定性，但表 5—3 中确已证明 $n-C_5$ 扩散 10m 花了 20000a，而 $n-C_{10}$ 却要花上 500000a，这样，可以想象得到 C_5-C_8 烃类较之 C_9^+ 以上烃类扩散程度快得多。

在所选择的长度范围内 L、压力驱动流和扩散流的比率将要考虑 Péccet 数，用 N_{pe} 代表其比率，可表示如下：

$$N_{pe} = \frac{VL}{D}$$

此处 V 为压力驱动流粒子速度，前面已经证实在这样层序中，每吨源岩可排出 19kg 的石油。分别取典型的石油和岩石密度为 $600kg/m^3$ 和 $2400g/m^3$，那么 19kg/t 变为 $0.076m^3/m^3$，因而从 10m 厚的层段中，5Ma 时间内从一个分界面排出的平均流体为 $5\times10^{-15}m^3/s$。取孔隙度为 2.5%，这时得到 $V=2\times10^{-3}m/s$。当 L=10m，应用 Leythaeuse 等(1982)的 D 计算值，得到 N_{pe}(表 5—4)。

表 5—4　不同组分的 N_{pe} 值

组　　分	N_{pe}
$n-C_5H_{12}$	0.13
$n-C_6H_{14}$	0.24
$n-C_7H_{16}$	0.47
$n-C_{10}H_{22}$	3.28

注：Péclet 数是无量纲数，其为估算平流和扩散作用的比率。

如果使用 Leytheauser(1982)的 D 估计值就要取 0.5 作为 N_{pe} 临界值，N_{pe} 值小于 0.5，表示扩散变得重要了。在前述方程中 V 和 L 减小一个数量级时，对于相同的 D 值，则 N_{pe} 将减小两个数量级。这就可以解释为什么对于重于 $C_9 \sim C_{12}$ 的分子扩散似乎是有效的问题。

以往的研究表明(例如 Leythacasus，1984；Mackenzie 等，1984)，源岩中石油的扩散伴随着有从 $C_{10} \sim C_{30}$ 组分的裂解。但在北北海启莫里阶粘土岩中却还没有观察到以往研究发现的现象。这说明其必定另有机制在起作用。以往研究的源岩与启莫里阶粘土间主要的差异是丰

度不同。以往源岩的有机质丰度低得多,且含气也多得多。在那种情况下石油既以液态也以气态出现。因此重于 C_{10} 的烃类的扩散主要与它们存在气相的可溶性有关,较轻的组分将不断地被排出,而北北海盆地中的启莫里阶源岩不存在气相,只有液体石油,因而它们从源岩中排出的次序和观察到的现象必然与以往的研究结果不同。

通过上述分析,对中北海区油气运移问题可得出以下几点看法:

(1)在中北海南维京地堑,启莫里阶粘土源岩主体处于 110～120℃时,正是该源岩活跃地产生和排出石油流的最佳阶段。从源岩中出现大部分扩散的温度始于 115℃的时候,其扩散率超过 80%,这些观察结果与所预测的结果相符合,在这个温度范围以上,源岩中产生和排出大量石油,这个结论是由 Cooles 等(1986)对源岩作世界范围的调查后得出的。

(2)当产生石油充填了源岩的大部分孔隙时,由于源岩中石油的饱和度或过饱和度孔隙压力的不断增加使石油不断排出。在厚泥岩边缘 5m 内,以及在薄泥岩中(<5m),扩散系数因毛细管作用而变大。毛细管压力差引起了石油从泥岩排出进入邻近的砂岩,对于扩散的出现不需要借助于裂隙,原始孔隙已足够使大量石油不断排出。

(3)分子扩散主要由形成的浓度差而造成的,似乎消除了压力驱动的影响,当然如同时存在压力驱动,那就使分子扩散变得更快。一般说来,轻组分扩散得快而重组分则较慢。

第五节　小　　结

从本章前几节的叙述中,不难看出目前对北北海盆地(也可以说是整个北海盆地)的油气运移方面的研究,尚处于局部地区的实际资料的描述阶段, 缺乏全面系统的论述。形成这种状况的原因是不难理解的。北北海盆地的范围大,又分属英国、挪威、丹麦等国,更增加了地区运移问题研究的人为障碍。

加之研究的深度不一,资料的限制,要对油气运移这个十分复杂而且涉及面广又不能直接观察和测试的问题,做出全面的叙述是非常困难的。

但是,已有的研究成果表明,北北海盆地自寒武系到第三系的许多层位都含有烃源岩,其中最主要的烃源岩是启莫里阶粘土层和相当于晚侏罗世到早白垩世的层位。因而反映在该区油气运移方面的研究上,也多限于侏罗系—白垩系的层位。现根据前几节对北北海盆地油气运移问题的讨论,归纳如下几点认识:

(1)已有勘探成果表明,北北海盆地的油气层目前主要集中在 4 个地质时期,即从第三纪到三叠纪,但有近 70%的石油天然气产于侏罗纪中,特别是中、上侏罗统地层中的油气储量占了绝大部分,这主要是由于良好的油源岩也存在于这段地层中。储集层主要为砂岩和白垩层(白垩系中),也发现有部分为泥岩储层的。

(2)对北北海盆地油气运移问题的讨论,主要以维京地堑和中央地堑为中心展开的,以侏罗系及其更新世地层中油气生成和运移情况为内容叙述的。通过油—源岩对比,说明在该盆地内的源岩主要是启莫里阶粘土岩组。该组地层分布广泛,有机质丰度高,总有机碳含量达 15%左右,平均在 8%以上,为油气生成提供了丰富的源岩,该源岩的成熟度随着其所处的地质构造位置不同而变化,在维京—中央地堑的中央部分已达过成熟和干气阶段,因而在地堑的不同部位出现了气、凝析油及沿地堑边缘为轻质油和重油的现象,到了盆地边缘则变为未成熟和欠成熟的页岩。

(3)油气运移主要受当时的构造条件所控制。表现在维京—中央地堑区的边界断层以陡

倾斜为特征，大量的次级断层形成了侧向的不连续性，造就了不同区块的渗透率的不同特性。在晚侏罗世层序中，斯坦特福约尔德砂岩和布伦特砂岩属高渗透层，油气通过这些可渗透单元，进行运移直至达到平衡。

（4）热梯度呈侧向变化的特征。在维京—中央地堑内测得热梯度为30℃/km，而同层的热梯度在霍达地台为50℃/km，表现为由西向东逐渐增加的特点。维京—中央地堑内还明显地表现为异常高压的特征（侏罗系和下白垩统中明显），使压力超过了总沉积负载的75%，而在第三系和上白垩统超压为中等，这主要是由地堑边缘的主断层构造起了隔挡层作用的结果，因而，在地堑区以外的地区，超压现象是少见的。

（5）已有资料表明，北北海盆地中的主要油源启莫里阶粘土岩组，在维京—中央地堑及其周围地区于白垩纪末已达到成熟，到古新世已为油气生成高峰期，自始新世起，地堑内的油气已开始向上及其两侧运移。油气的生成历史与东设得兰盆地中布伦特砂岩成岩研究的结果是一致的。盆地内油气运移与伊利石成岩作用是同时发生的，经对伊利石纯胶结物的放射性年龄测定得出45～55Ma，这说明侏罗纪生成的油气到古新世末期发生了运移。

（6）北北海盆地中镜质组反射率（R_o）在0.5%～1.3%之间，为油窗阶段，一般埋深在2250～4500m；湿气带为1.3%～2%，一般埋深在4500～5400m之间。晚侏罗世—白垩纪晚期地层中，盆地中广泛存在着异常高压，这种异常压力的过渡带一般在2350～3850m之间，而在2350m以上埋深的部分白垩纪和第三纪地层则属正常压力范畴，在3550m左右，埋深便开始进入异常高压带，而且异常高压随深度的增加而增大，直至晚侏罗世地层底部。由于异常高压形成的微裂隙，使启莫里阶粘土层等源岩中生成的油气沿裂隙向上运移。大规模的垂直运移，是该区油气运移的主要特征。从油气田绝大多数集中于维京—中央地堑范围内及其周缘，就是个很好的旁证。

（7）根据一些小范围的油气运移研究表明，在盆地中油气运移的过程大概是这样的，即在埋深>3500m的超高压晚侏罗世和白垩世泥岩中的油气，是通过微裂隙不断向上运移的，即以油相或气相为主进行初步运移。当运移到埋深<3500m以上地层时，则主要呈现出水溶状态的运移特征。向上运移到埋深<2350m时，由于压力的降低则油气便从水溶液中析出，到达圈闭储集层中，形成油气田。已有的统计资料也可充分说明这一点，有70%的油气田埋深都小于2500m，而且其中埋深<1500m的占30%。以上这些特点不难看出在该区油气垂直运移的地位了。但是我们也不能因此否认侧向运移的存在，特别是在维京—中央地堑以外的地区，侧向运移的重要性更明显地表现出来了。

（8）综合数学模拟方法对比北北海盆地的油气运移研究所取得的成果，对盆地的油气勘探与开发具有重要的意义。通过THEMIS模式对不同时代，模拟石油形成和运移，结果表明在88Ma前（晚白垩世）都林组于地堑内开始生成油气；在53Ma（古新世期间）前都林组中油气已达过饱和并向外溢出，运移到布伦特砂岩中；到29Ma前（渐新世期间），油气开始从地堑中大量向外运移到储集层中。通过模拟计算出了目前油气聚集及分布状况。

总之，北北海盆地的油气运移研究尚待深入，尚有很多问题未能得出圆满的解释结果，这些问题的解决将大大帮助石油勘探工作的发展。

第六章 北北海盆地的油气远景区

一个油气远景区是一套石油地质要素有机配合的综合结果，它构成了油、气聚集所必备的条件。在一个含油气远景区内，纵向上看可以包含着若干个油气勘探层带，横向上又可以发现若干个油气田或油气藏，以及若干进一步勘探的远景圈闭。然而，各种石油地质控制因素有机质结合的最有利部位，却常常出现在一个有限的区域内，这就是通常被称之为油气聚集的有利地带。北北海盆地勘探实践说明，它的情况也不例外，而且表现得尤为明显。那里几乎所有重要的油气田、大油气的发现，包括第三系油气田的发现，都被局限于中生代主要裂谷盆地之中和它的边缘（图 6—1）。

在北北海盆地油气勘探的过程中，不论是对原有油气远景层带的扩大，还是开发新的油气

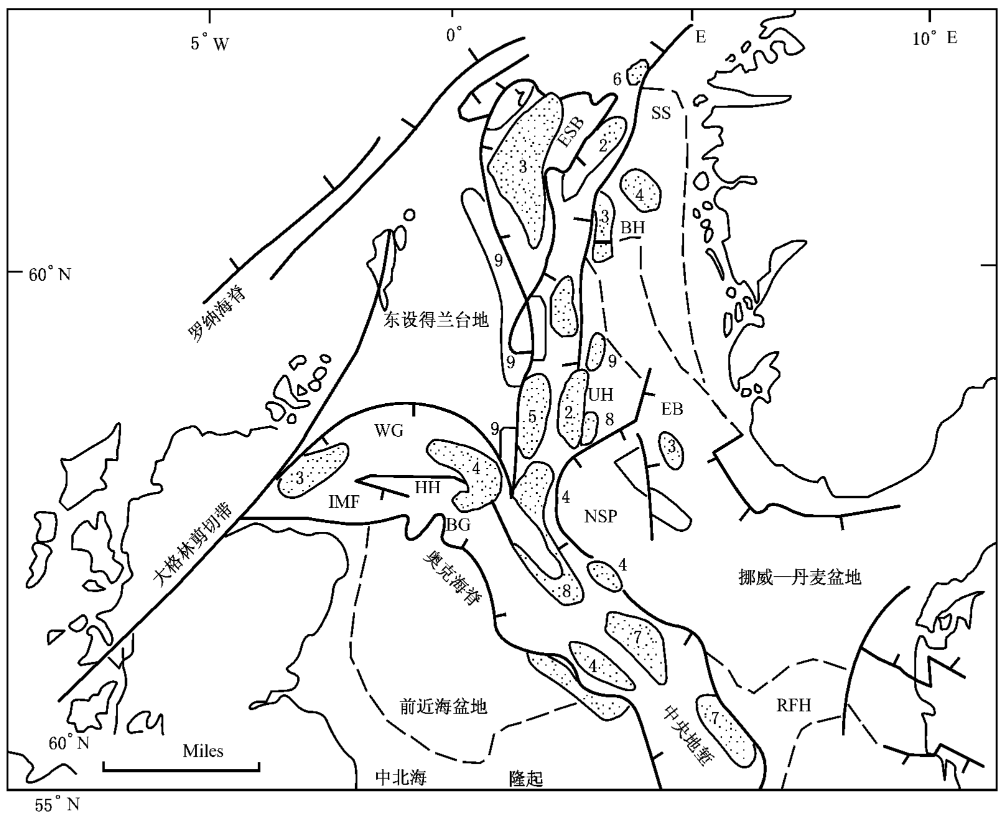


图 6—1 北部北海油气藏有利远景区带分布图

1—地堑边缘古生代油气藏聚集区；2—中、下侏罗统气/凝析油藏聚集区；3—中、下侏罗统油藏聚集区；4—上侏罗统浅海砂岩油气藏聚集区；5—上侏罗统扇/浊积砂岩油藏和气/凝析油藏聚集区；6—下白垩统油藏和气/凝析油藏聚集区；7—上白垩统/达宁阶灰岩油藏和气/凝析油藏聚集区；8—下第三系砂岩油藏和气/凝析油藏聚集区；9—下第三系砂岩重质油藏（或中等重质油藏）聚集区；BG—本奇地堑；BH—贝尔根隆起；EB—伊洛尔桑德盆地；ESB—东设得兰盆地；FMR—福蒂斯—蒙特罗斯山脊；HH—哈利布特地垒；IMF—内默里湾盆地；NSP—挪威盐丘台地；RFH—林克宾芬隆起；SS—索恩陆棚；UH—乌特希拉隆起；WG—威其格朗德地堑；VG—维京地堑

勘探远景层带，石油地质家们都必须充分依靠收集到的大量地震资料和钻井资料，以及应用区域地质构造模型对已取得资料的解释，特别是一些新资料的补充，是非常重要的。因为北北海盆地的油气勘探程度，已达到相当精细的水平，只有依靠新资料的取得，才可能不断修正已有的认识，使之对油气勘探远景的认识水平，逐渐接近客观实际。

地质家们对一个地区的石油地质观念和认识不断演进，也就会对这个地区的油气远景层带不断有新的发现和开发。而对一个地区的石油地质观念的演进，往往又依赖于对勘探中取得的各种信息的综合和勘探水平及质量的不断提高。例如，布伦特砂岩油气藏聚集带的建立是随着地震勘探质量的不断提高达到的，它们暗示以前认识的白垩系底部构造可能和（与东格林兰盆地断块相似的）侏罗系旋转断块有关。不过，常常也有一些油气藏的发现是在勘探其他油气目的层过程中获得的情况。例如，原实施的目地在于向北拓展福蒂斯蒙特罗斯油田古新统砂岩油气藏聚集带范围的勘探活动中，发现了派普尔（Piper）油田的上侏罗统砂岩油藏（Williams 等，1975）。

在北北海对一个尚未钻探过的油气远景区，其未知程度可以通过 4 项主要地质参数的确定来描述：

（1）地质历史中某一特定时期存在封闭圈闭的可能性；

（2）存在孔隙性、渗透性储集层的可能性；

（3）地质历史中某一时期，油气通过储集层运移的可能性；

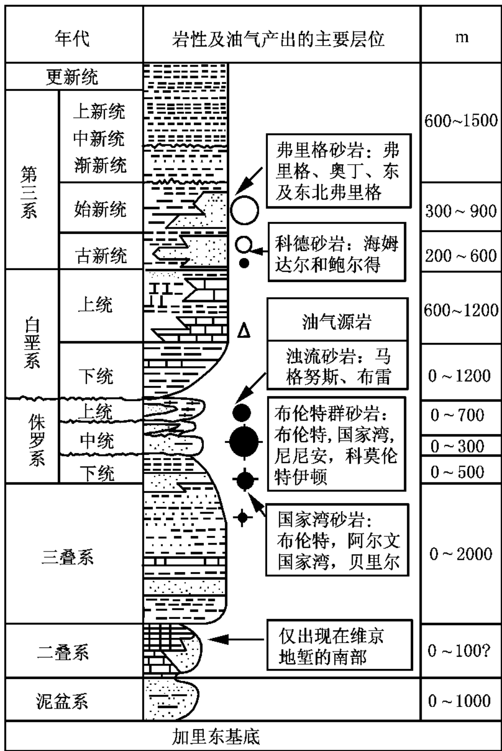
（4）圈闭形成早于油气运移的可能性以及油气聚集保存至今的可能性。

对一个具体的油气远景区而言，有些地质因素是独有的，比如圈闭的几何形状，而其他地质因素则受到更广泛的区域范围的控制。例如，潜在储油气层产状问题，可以通过考察古地理模式、沉积模式和成岩变化模式加以解决和进行确定。

北海北部许多圈闭的形成和构造活动与裂谷作用所产生的张性断裂过程有关。从三叠纪至白垩纪这种张性断裂活动呈周期性发生，但至第三纪才几乎完全终止，进入了一个持续至今的广阔盆地式的沉降时期。中北海隆起以北上侏罗统主要生油岩的油气生成和运移，开始于白垩纪末，并持续到近代。圈闭形成与油气运移时间相配合，显然对大多数中生代构造圈闭有利。对于上白垩统和第三系油田，情况就不同了，它们中的许多圈闭在油气运移发生之后才开始形成。第三纪时期除了由于盆地沉降引起的地层翘倾外，几乎没有构造运动破坏早期已形成的油气聚集，所以，总体上说，对油气保存条件有利。但是北海北部的斯莱普纳尔（Sleipner）水域有拉拉米期（Laramide）断层重新活动的证据。

控制北海油气远景区带分布的主要因素是，上侏罗统生油岩深埋在中生代地堑内才达到了成熟，油气以垂向运移为主，很少发现有油气大规模侧向运移的证据。另一个重要控制因素是主要储集层的分布，从泥盆系至始新统都有储集岩（图 6—2）。以储集层为基础，才易于将北北海油气远景区带分门别类加以讨论。

应该注意的是控制南北海盆地的油气远景区带分布的因素是与北北海盆地大不相同的。在南北海主要生油岩位于威斯特法阶和下侏罗统，受晚白垩世和早第三纪（拉拉未运动）构造运动的强烈影响。最后的回返运动导致局部断裂的产生，引起油气从已有圈闭中溢出散失。这也是把北海盆地分为南、北两部分来讨论的重要原因之一。



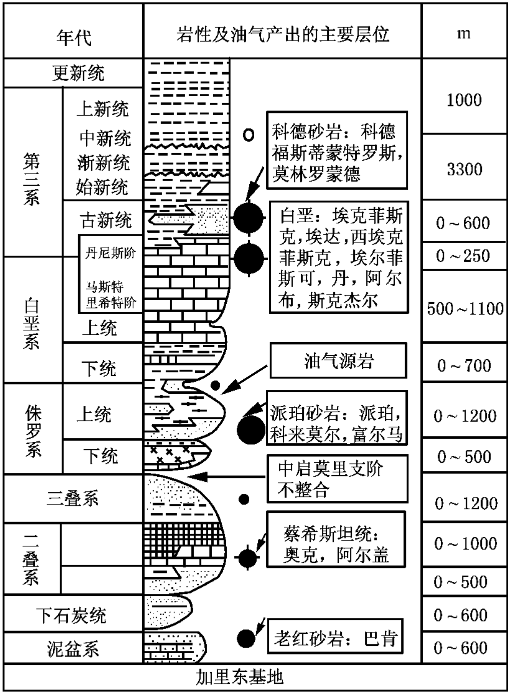


图 6—2　北部北海主要储集岩(引自 Ziegler,1977)

第一节　下第三系砂岩油气远景区带

下第三系砂岩主要油气远景区带的位置见图 6—1。产轻质或干气—凝析油的远景区带位于潜伏的中生代地堑轴部之上,油气远景区带一般坐落地堑边缘上盘之上。控制这些远景区带的主要因素是砂岩储集层的分布,以及未受断裂影响与向盆地倾斜有关发育而成的圈闭。这些控制因素表示在图 6—3 中。

早第三纪时期,东设得兰地台的上隆和侵蚀导致形成大量的砂粒,往东和东南搬运进入发育中的盆地沉积中心。这些沉积中心基本上与潜伏的维京地堑和中央地堑的位置相一致。在北部有利地带西部的浅海沉积环境和三角洲沉积环境向东转变为深水海底扇沉积环境。大陆架外向东搬运的沉积物受盆地轴向的影响,呈南北向趋势分布,结果,下第三系砂岩在盆地东翼基本上缺失。不过,向东南方向移动的砂体,顺着盆地轴和被海底水流带到更远的地方。浊流砂体向南可沉积在远达北纬 56°的附近,然后,逐渐被远源盆地泥质岩所取代。应该提到的是在北海北部,Enjorlas 等(1985)曾绘制出达宁阶和下古新统的长达 100km 以上的独立延伸砂体,但上古新统和始新统的砂体与其相类似,可延伸的距离却小得多,仅只 10km 左右。大多数储集层被解释为多层叠加的舌形体,浅水沉积环境可以解释所有这些沉积模式。

由于第三纪时期地层中不存在大断层,因而大面积盆地沉降,造就了一个几乎没有间断的油气运移通道,油气顺着这些储集层可运移直达西部或西北部的地面露头。这条通道上的圈闭是控制这些油气藏形成的一个关键因素。现已识别出北海下第三系有 3 种主要的圈闭类型:

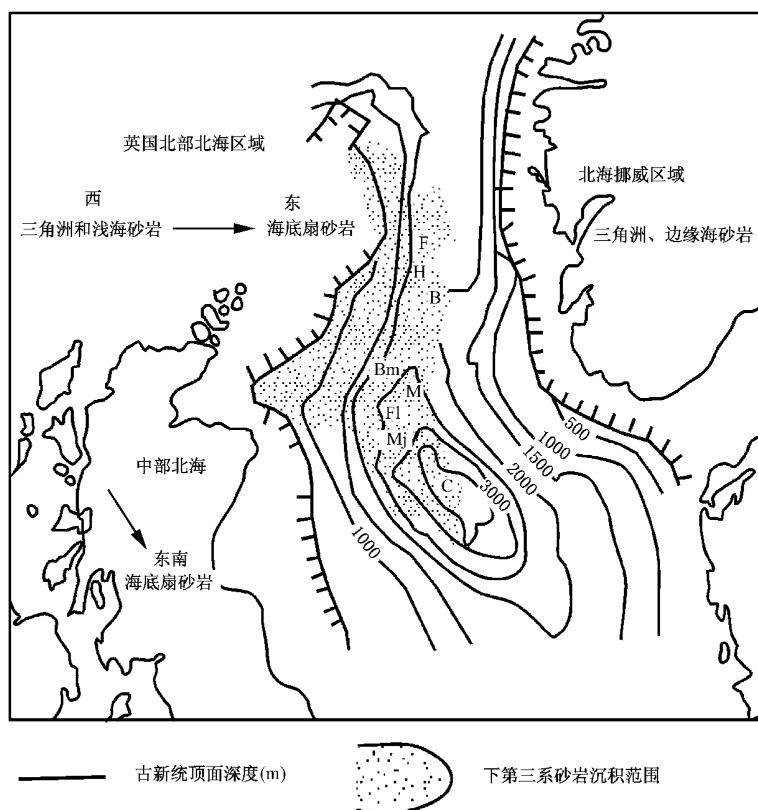


图 6—3　下第三系砂岩油气藏有利聚集区图

（引自 Hamar 等，1980；Rochow，1981，Rorker，1975）

F—弗里格；M—贝尔德；H—海姆达尔；Bm—巴尔莫瑞尔；

M—莫林；Ft—福蒂斯；Mt—蒙特罗斯；C—科德

(1)披覆在地堑中部地垒上的地层倾斜闭合圈闭；

(2)盐丘引起的地层倾斜闭合圈闭；

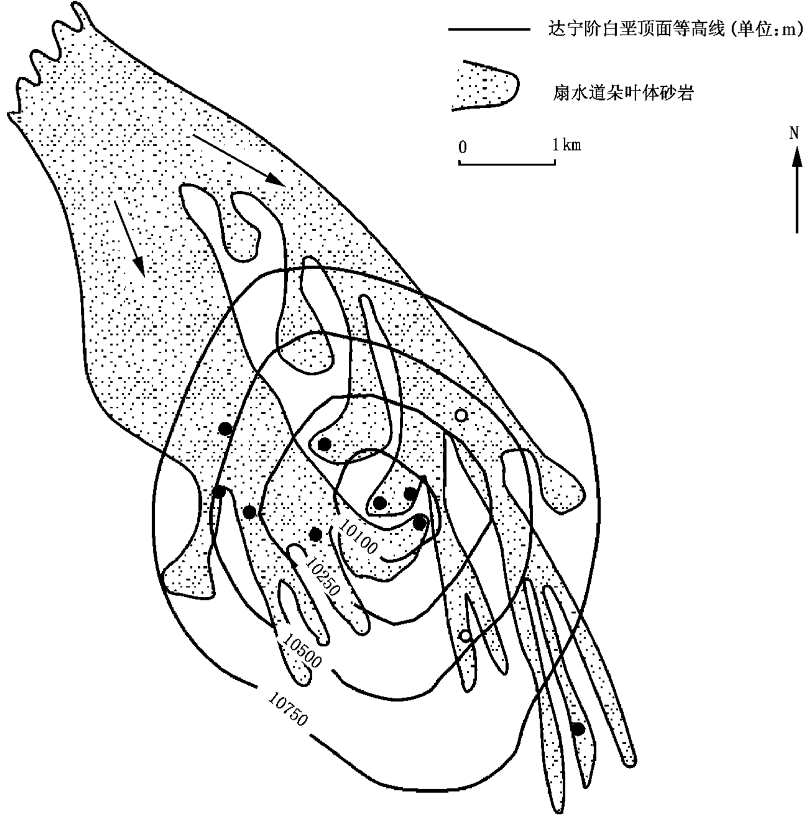
(3)地层圈闭。

在下第三系砂岩中找到的两个大油田(福蒂斯油田和蒙特罗斯油田)，其位于近南东向倾伏的福蒂斯蒙特罗斯构造脊上；油田圈闭类型属地层倾斜闭合型，顶部盖层是古新统地层。油藏成因不是与这个早第三系可能重新活动上隆的侏罗纪高地有联系，就是与岩层的披覆作用有关(或者两者兼而有之)。不论那种情况，圈闭都直到中新世才发育完全。这与中央地堑在白垩纪末开始生成石油相比是晚了些，尽管地垒块体本身受到深部断层的控制，但是几乎找不到证据证明这些断层穿透了上部的灰岩抵达下第三系储集层。因此，时至今日，侏罗系油气如何运移进这些圈闭，尚未得到完满的阐明。

福蒂斯油田的开发资料表明这些海底砂岩的沉积几何形态错综复杂。然而它对开发这些大油田，并未产生显著的影响，但它却成为降低下第三系地层倾斜闭合类油藏商业价值的一个主要因素，因为这类圈闭闭合的总体积相对较小，在二叠系盐丘发育的区域，底辟构造上具有众多的地层倾斜圈闭。可到目前为止，仅在英国莫林油田和挪威科德油田发现具有商业价值。

科德油田的评价历史说明了这个问题。1968 年发现了该油田，因为储集层情况难于预测使评价工作如同捉迷藏。在 11 口井中有 9 口井(图 6—4)发现油水界面互不一致和地层压力

各不相同的气—凝析油藏。在构造高点上两口井都是干井，现已认识到在这个貌似简单的穹隆构造上至少有 9 个独立的油气聚集体。圈闭这些油气的各储集层可能与 3 个独立的海底水道砂体和朵叶状前积扇体有成因联系，油田的复杂性，还可能与同生沉积构造的生长作用加剧有关。



解释的横剖面

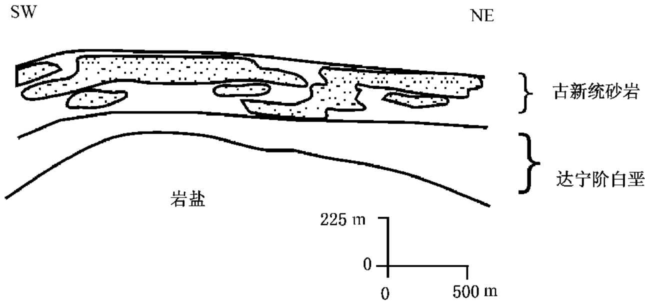


图 6—4 科德油田储层平面、剖面分布图(引自 Kesgler 等，1980)

在盐刺穿作用的北部边界以外，这种复杂的沉积过程提供了形成圈闭的主要机制。两个鲜明的例子是弗立格和贝尔德油田(图 6—5)。弗立格油田的圈闭形成与富含厚层砂岩的水道扇叶体沉积有关，也和水道边缘的差异压实作用产生的构造隆起有关。形成贝尔德油田近 60m 的垂直闭合度主要依赖于中—上古新统中海底扇砂岩顶面的不规则造成的。顶部盖层的不规则底面是由于受沿盆地轴向朝南流动的水流和由潮汐产生的东—西向水流对水下沉积物海底侵蚀作用的加剧和上叠堆积的叶状扇体所产生的沉积起伏引起的。

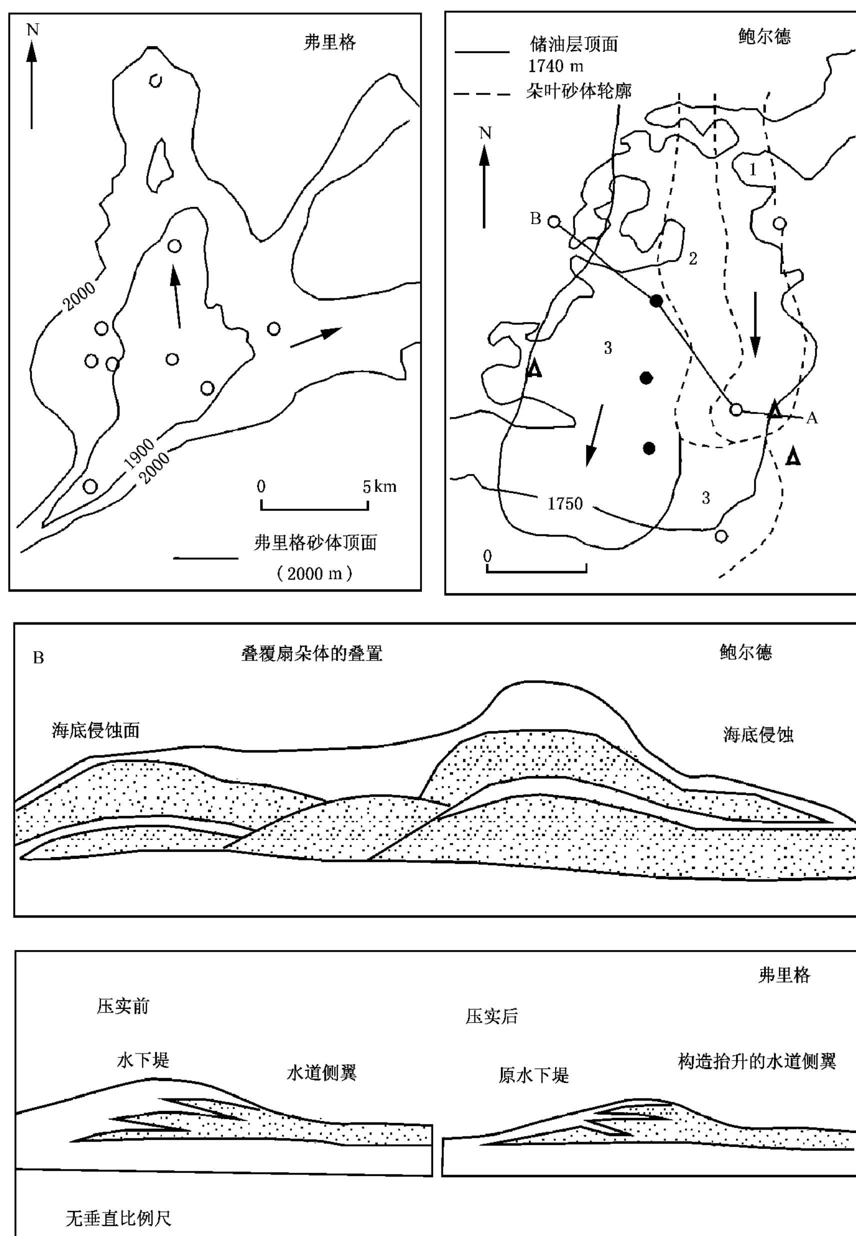


图 6—5　弗里格油田与贝尔德油田圈闭形成机制的比较

(引自 Herifier 等,1981;Sarg 和 Skjold,(1982)

贝尔得德油田含有 25°API 重质油,沿东设得兰地台的边缘已发现了众多的重质油藏(一般在 10°～20°API 之间,图 6—1)。与区域地层东倾相反的西向圈闭与浅海砂体和三角洲砂坝砂体造成沉积地貌有关,并因差异压实作用增强了这类圈闭的能力。下伏砂坝上的席状砂岩的披覆作用也可形成圈闭。在某些情况下,构造活动形成了圈闭,其容积可因相变产生的地层圈闭作用而增大。一般埋深较浅,松散的储油砂岩以及储集层中水和稠油的相对流动性等不利因素妨碍了已捕获石油的大量商业性开采。

在北部北海盆地东端的下第三系砂岩上倾的页岩封闭,为地层圈闭提供了机会,尽管曾报

导在挪威 16/4 区块有这样特征的远景圈闭，但其商业价值尚有待证实。

油气怎样从深埋的上侏罗统生油岩运移至古新统和始新统砂岩储集层的，目前这个机制尚不明了。但二叠系盐丘底辟构造刺穿了上侏罗统且伸展到下第三系，显然，为中央地堑的油气运移提供了一个机制。对维京地堑是否也存在着盐丘刺穿构造尚无有利证据说明。图 6—6 展示了中生代地堑石油密度的分布与第三系地层底界埋藏深度的对比关系。已发现的全部油藏中最轻质的油和凝析油（包括第三系储集层的油）都产自第三纪时期上侏罗统生油岩埋藏深度最大的地区，这意味着油气极可能自下而上垂直运移。在北海目前尚未找到什么资料说明油田长距离侧向运移至圈闭的证据。有关北海北部油气藏生成和运移的研究中，Goff（1983）曾认为弗里格油田的气和重质油（24°API）不但都生成于上侏罗统而且向上垂直运移穿过 2000m 厚的未受断裂影响的白垩系和古新统泥岩（图 6—7）。他认为在 3500 m 以下石油首先以气相从上侏罗统超高压微裂缝排出到白垩系泥岩中，然后在浅于 3500m 深度，以水溶状态运移进储集层中。他还认为启莫里阶泥岩在圈闭形成之前，已处于生油高峰期达 10～20Ma 之久，而该生油岩开始生气时间与圈闭形成时间大约相当，所以，在此之前生成的轻质油也许向上运移时，由于当时储集层尚未封闭，地层水与海水相通，使得轻质油遭受循环水的冲洗和

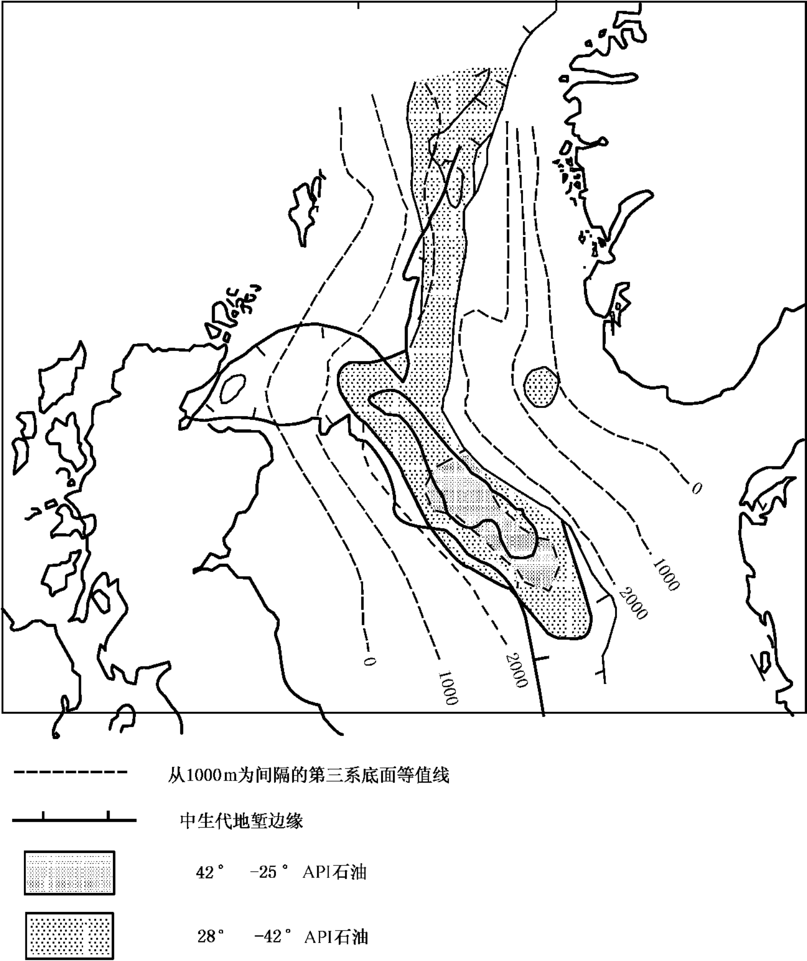


图 6—6　中生代地堑位置及其与石油密度有关的第三系埋深

（**引自** Barnard **和** Cooper，1981）

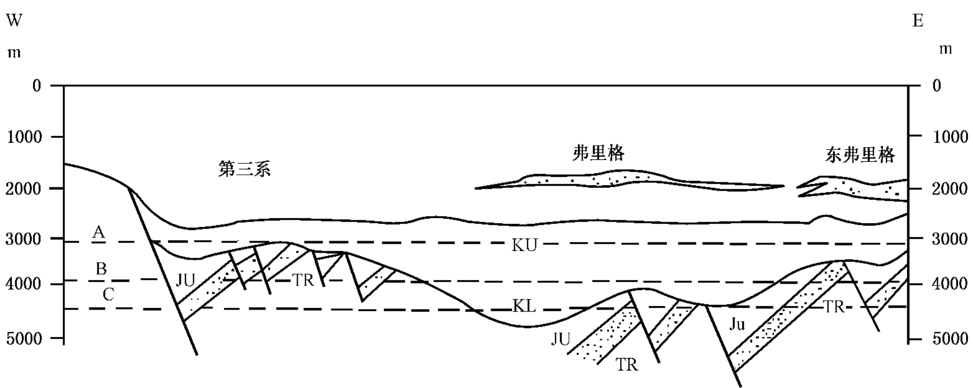


图 6—7　横穿弗里格油田的北维京地堑横剖面图，表示目前生油成熟度的等深线

（引自 Heritier 等，1981；Goff，1983）

A—生油高峰上界；B—生气上界；C—石油窗的下界；TR—三叠系；J_{L-M}—中—下侏罗统；JU—上侏罗统；KL—下白垩统；KU—上白垩统

生物降解作用，损失了烷烃组分，使它原地转变为重质油。也有人提出，地表水从设得兰地台东部露头区向朝东倾斜地层渗透时带入细菌，在温度大于 60℃ 的地层内，细菌活动减弱，大于 60℃ 的地层一般埋深大于 2000m，所以在大于这个深度的第三系储集层中，轻质组分得到保存，也易于打出高产能、质地好的油井。

第二节　白垩系和下第三系白垩层油气远景区带

北北海下白垩统储集层中发现的油气到目前为止，只占油气藏发现总量的一小部分。其原因看来是上侏罗统成熟油源岩所在的主要地堑范围内，该储集层一般发育较差。

在内默里湾盆地内（图 6—8），下白垩统砂质含量很高，但此处启莫里阶泥岩埋藏太浅，作

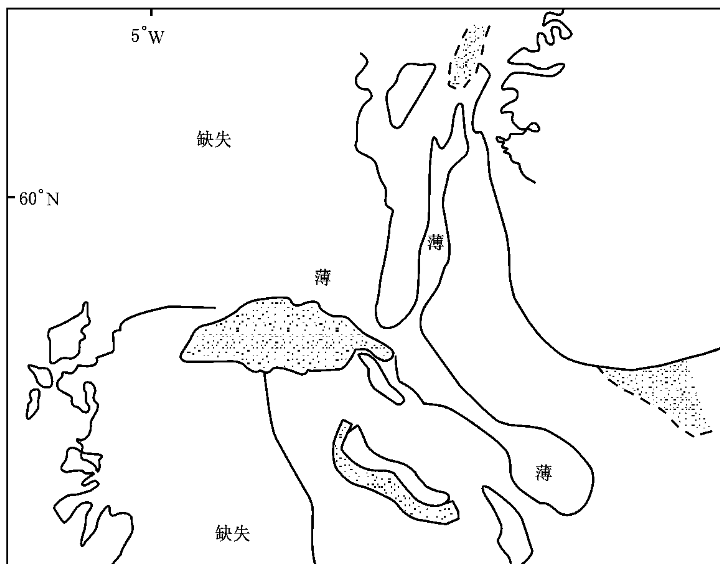


图 6—8　北海下白垩统砂体主要发育区分布图

（引自 Ziegler，1981；Day 等，1981）

为油源岩尚未成熟。向东即进入威其格朗德和本奇地堑，此处，油源岩已达成熟，可下白垩统砂岩迅速尖灭变成深水泥岩。在局部上隆断块上，沉积形成了良好储集层；在这些储集层中有相当数量的油和气—凝析油聚集。

向北远在莫尔盆地东部边缘，找到了凝析气藏；储集层发育在海底扇复合体的中端和远端（阿普第一阿尔必阶）的叠复水道层序中已发现了凝析气，称为埃旦（Idun）油田。钻井中证实各储集体相互不连通，因此它们商业产能前景令人怀疑。

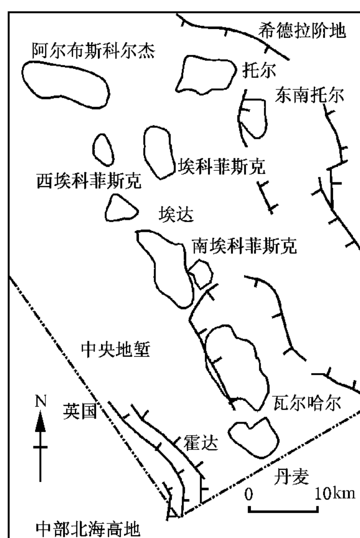
北北海区上白垩统和达宁阶中广泛分布着白垩岩，但是白垩岩具有商业价值的产油区，只局限在中央地堑的两个狭窄的有利地带内（见图6－1）。尽管其沉积孔隙度可高达70％，颗石藻小片晶的低镁方解石成分相对地阻碍早期成岩变化的作用较高，但是随着埋藏深度的增加，机械压实作用和方解石的溶解和再沉淀作用会急剧地降低孔隙度。然而埃克菲斯克油田的白垩储集层平均孔隙度却高达32％，而在此深度（3170m）的预期孔隙度一般应当在2％～25％之间。令人尤为注目的是此深度的预测渗透率值应为$0\sim0.5\times10^{-3}\mu m^2$，而依据埃克菲斯克油田生产数据求得的有效渗透率为$12\times10^{-3}\mu m^2$。

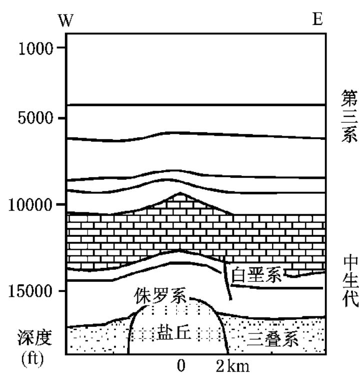
北海挪威水域的白垩岩储集层的油田见图6－9，所附埃克菲斯克油田的横剖面图，说明图上那些穹隆构造是由于深部二叠系盐刺穿侵入造成的，埃克菲斯克油田地区的盐运动可能开始于三叠纪，到白垩纪和达宁期盐运动速度变慢，其后在早第三纪时期由于碎屑沉积物的载荷使盐丘重新活动。所以盐丘活动侵入较强的阶段与上覆上侏罗统生油岩的生油高峰阶段大约在同一时间，颗石藻和小片晶方解石的早期“点焊接”使白垩岩形成了坚固的刚性岩石格架，导致直接伏于盐刺穿活动上部地区，岩石产生张性的微裂缝。裂缝穿过薄层或弱结构带的白垩岩时，破裂缝造成的基质岩块一般仅为1至2cm（如Tor组），而在泥质含量高的地带裂缝造成的基质岩块达到50cm至1m。现在可以相信，油穿过这些裂缝向上垂直运移，当裂缝系统中油柱高度达到50～100m时，产生的浮力足以使油克服毛细管的排替压力挤入十分狭小的基质孔隙喉道。Hardnan和Kennedy(1980)已观察到，可能由于这一作用的结果，闭合度大的构造中油饱和度较高，而低闭合度的圈闭其基质孔隙中含水高。当石油早期进入基质孔隙的排替压力伴随膨胀形成的超高压抑制了岩层的化学成岩变化和减少了一部分岩石颗粒所承受的上覆压力，结果造成了岩层随埋藏深度的正常成岩过程放慢了。D'Heur(1980)认为这些过程在上升穹隆的中部最明显，向翼部逐渐减弱。这就有可能解释为什么西埃科菲斯克油田随孔隙度减少，油层含水饱和度增加，形成凹形油水界面。另外，Munns(1985)曾报导在亲水的白垩岩构造中，3000m深的孔隙度为20％～28％，引起了对延迟化学成岩作用重要性的某些怀疑。

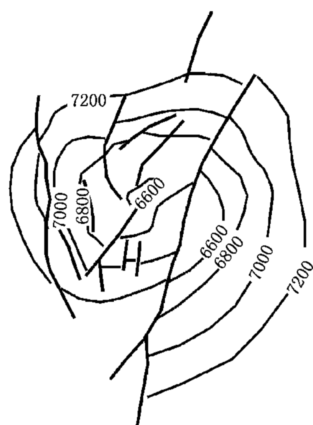
至今，微裂缝仍保持开启，流体始终与基质孔隙保持良好的连通性，因此，形成了观察到的总体渗透率比预测值高的原因之一。可是当观察取到的岩心时，裂缝常常是闭合的。

丹麦的白垩岩油田与挪威的该类油田基本相似，只是产能小些。目前开发的主要油田多在宽大的穹隆构造上。估计这种构造裂缝发育程度差，如丹（Dan）油田，戈姆（Gorm）油田和蒂勒（Tyra）油田（参见图6－9）是3个典型实例。相反斯克乔德（Skjord）油田坐落在一个刺穿构造之上，发育较多张性裂缝。值得提出的是丹油田存在一个游离气顶，而戈姆油田是不饱和的，这种差异被认为是由盖层封闭能力不同而产生的，就戈姆油田来说，盖层封闭性差不足以阻止天然气散逸到更浅的岩层中去。

油从侏罗系生油岩如何穿过下白垩统泥岩进行垂直运移的机理尚未得到令人信服的解







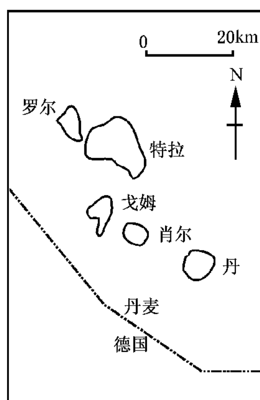


图 6—9　挪威和丹麦(水域)的油气田位置及其埃科菲斯克油田和戈姆油田的构造细节图

(引自 Keiulesy,1980;Thomas,1980;Hurst,1983)

释,可形成通道的断层作用是常见的现象(如丹油田),但并不是处处都存在着。D'Heur(1980)曾报导在西埃科菲斯克油田,没有发现断层。

目前资料表明,控制有利地带的首要因素看来似乎是白垩岩自身的分布和深部二叠系厚层岩盐的分布状况(图 6—10)。油气垂直运移的必要因素进一步将油气远景区带局限在中生代地堑的范围内。然而令人惊奇的是勘探活动查明这个油气远景区带的范围较窄小,可能有其他一些因素起着控制作用。例如,圈闭形成和油气运移的相对同步是至关重要的。圈闭形成后的油气运移可能不利,因为那时微裂缝可能已变得闭合,阻碍油气进入基质孔隙。第二个控制因素是白垩岩原始孔隙度的演化程度,同沉积期的或早期沉积后的扰动和由未石化的碎屑流和浊流的再沉积作用,提高了白垩岩的原生孔隙度。在挪威和丹麦两区产油的白垩岩储集层都能在岩心中找到滑塌沉积,即重力滑动、碎屑流和浊流的证据。Nygaard 等(1983)曾总

结认为外来的沉积单元具较高的孔隙度和含油饱和度。这是由于再沉积作用将早期白垩岩构造崩解的结果。触发这类重力引起的运动需要的坡度，不是与大范围的地震断裂活动有关，就是与局部地区的盐丘活动有联系。Skovbro(1983)在解释浅水区储集层与深水区储集层的差异时，提出较深水区的白垩层沉积时，可能接受了较大比例的外来物质(如阿尔布斯克吉尔、埃科菲斯克和托尔油田)，来解释与浅水区储集层发育的差别。D'Hern (1984,1985)认为整个白垩岩是它生的快速再沉积单元形成最好的储集层。构造扰动可能与沿着主要断层的同沉积运动有关。晚白垩世断层活动的位置见图 6－10，从图上可看出具有商业价值的有利地带邻接再次活动的地堑东侧边缘断层附近。与地堑西部边缘断层邻接的英国海域内的白垩岩缺乏商业性的产层，这可能与盖在白垩岩之上的第三系碎屑岩层的底部存在砂岩有关(参见 6－1 和图 6－3)。白垩岩产生裂缝、油气运移和形成超高压时的埋深从 450m (戈姆油田)至 1050m (霍德油田)。令人惊奇的是当白垩岩储集层的压力增升时，为什么其顶部没有被刺穿或破坏。这可能是由于第三系泥岩快速沉积，本身也具有超高压的缘故。很明显，下古新统大量砂岩存在会降低砂泥岩互层的有效封闭能力。

第三节　上侏罗统砂岩油气远景区带

上侏罗统砂岩油气远景区在北海分布广泛，一直是很活跃的勘探目的层(参图 6－1)。这套砂岩常常与启莫里阶泥岩生油岩呈互层或直伏其下，因而，油气运移的路线相对短而简单，运移效率高是可想而知的了。

一、上侏罗统浅海相砂岩油气远景区带

北海晚侏罗世的广泛海侵，导致在一些主要盆地的边缘，发育了滨海和浅海沉积，这类沉积环境具有较高的波浪和潮汐能，又有适量的沉积物供给，因而堆积了高质量的砂岩储集体。

在默里湾盆地外部，卡洛夫阶—牛津阶，在威奇格朗得地堑内沉积了高能砂岩，构成了派普尔油田的储集层，该油田的这些砂岩体可能为位于一个活动生长断块之上的远岸砂坝沉积。断层活动可能早在三叠纪时已经开始，但是直到晚侏罗世才有重要断层活动的记录，此时的沉积物类型明显受区域构造活动的控制。在莫里湾盆地外，一般认为侏罗纪末期断层活动尚未终止，而是如同东设得兰盆地一样，一直延续到早白垩世，可能在森诺曼期才结束。晚白垩世沉积物超覆在这类构造之上，直到坎佩期构造顶部才被沉积物覆盖，形成封闭盖层。如上述构造断续生长或者发育形成起伏更大的地貌，那么其顶部盖层就应是马斯特里赫特阶白垩岩，而不是坎佩阶泥灰岩。Maher(1981)推测，相邻断块的另一相似构造没有装有油气，这可能是因为它的顶部盖层是白垩岩，而上覆第三系在此区域又以砂岩为主，封闭能力差有关。在第三纪早期(可能古新世)上侏罗世油源岩开始达到成熟，所以时间因素对此油气运景区带的形成是有利的。

可是，控制此有利运景区的主要因素是派普尔砂岩的分布状态。向盆地中心该砂岩逐渐过渡为泥岩，而向邻近的基底隆起砂岩呈楔形尖灭。往西进入莫里湾盆地内，由于启莫里阶油源岩尚未成熟，因而使这一带的油气远景受到限制。

沿中央地堑的翼部发育着一套相似的砂岩层(参见图 6－1)，它们为西部的富尔马和克莱德油田，东部的尤拉油田提供了储集层。该砂岩储集层遍及整个尤拉油田(图 6－11)并延伸到南维斯特兰拱起东部；在地堑东侧主断裂下盘，砂岩达到其最大沉积厚度(大约 150m)，向西

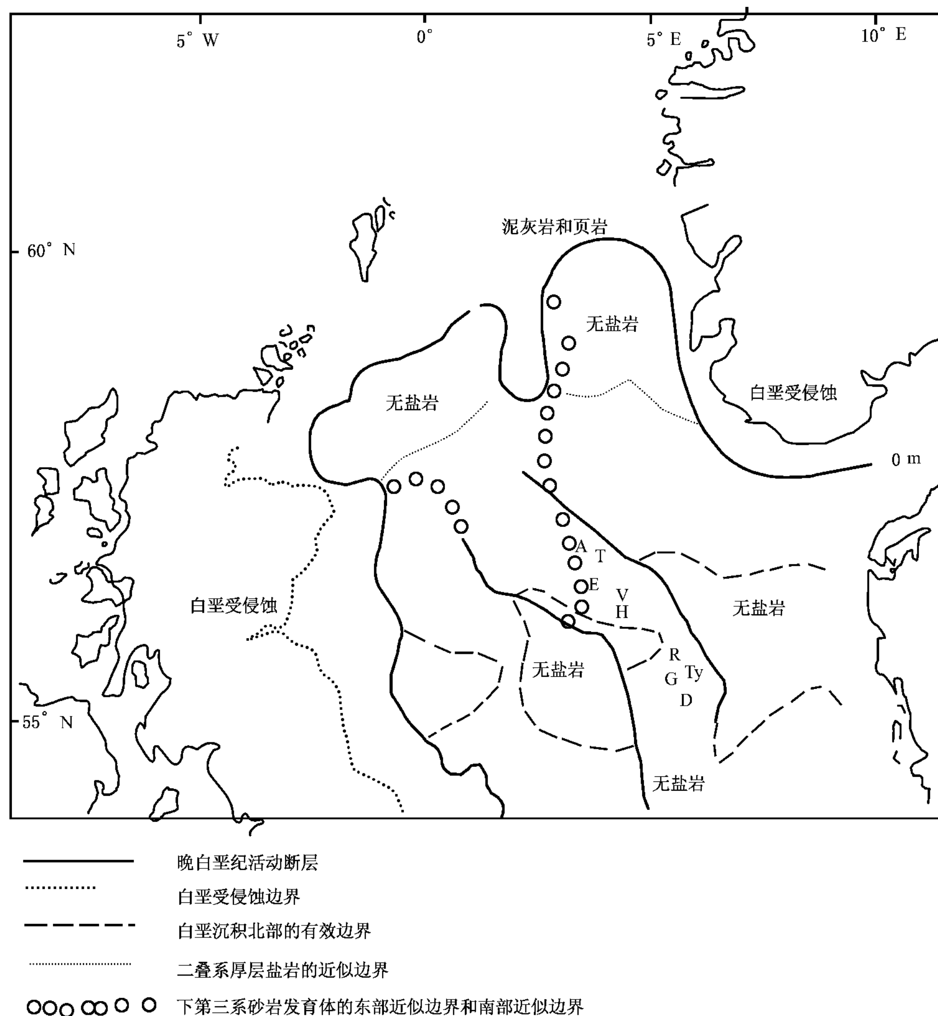


图 6—10　白垩储层油气藏有利远景区图

(引自 Hancock 和 Scholle,1975;Taylor,1981; Day 等,1981)

进入盆地中央渐变为页岩。奇怪的是,储集层在构造顶部最厚,而这一构造现象被认为是由深部盐枕作用形成的。这也表明它是被抬升的一个小规模的沉积中心。据 Bailey 等人(1981)的研究,构造形成于从中生代至中新世的某个时期。储集层砂岩的堆积被认为是沿着活动地堑边缘断层的下盘(尤拉油田走向)在深水中不断捕获迁移着的潮汐砂坝而形成的。在许多方面克莱得油田(图 6—11)类似于尤拉油田,只是构造发育与盐丘活动无关,仅与滑脱断裂作用有关。

沿中央地堑的同沉积断层活动引起这些浅海砂岩移动,以重力流方式再次沉积。因而控制油气有利地带的主要因素是上侏罗统砂岩的分布状况,某种程度与其中启莫里阶的不整合面的起伏不平有关。沉降与沉积物补偿之间巧妙的平衡对提供相当厚的有商业性价值的储集层组合是非常重要的,这种条件以沿地堑边缘断层的下盘发育最好,从而形成了一条窄的有利地带。然而,由于盐运动的活跃使沉积过程中也产生了局部有利地带。

根据已有文献资料圈定的中央地堑上侏罗统有利地带的位置与勘探钻井已证实有利地带是沿着地堑边缘扩展的情况一致,在侏罗系砂岩中找到了许多油气藏(参见图 6—1)。中、上

侏罗统的三角洲和海岸砂岩穿过了霍达台地向西扩展，构成挪威北海海域北部特罗尔特大气

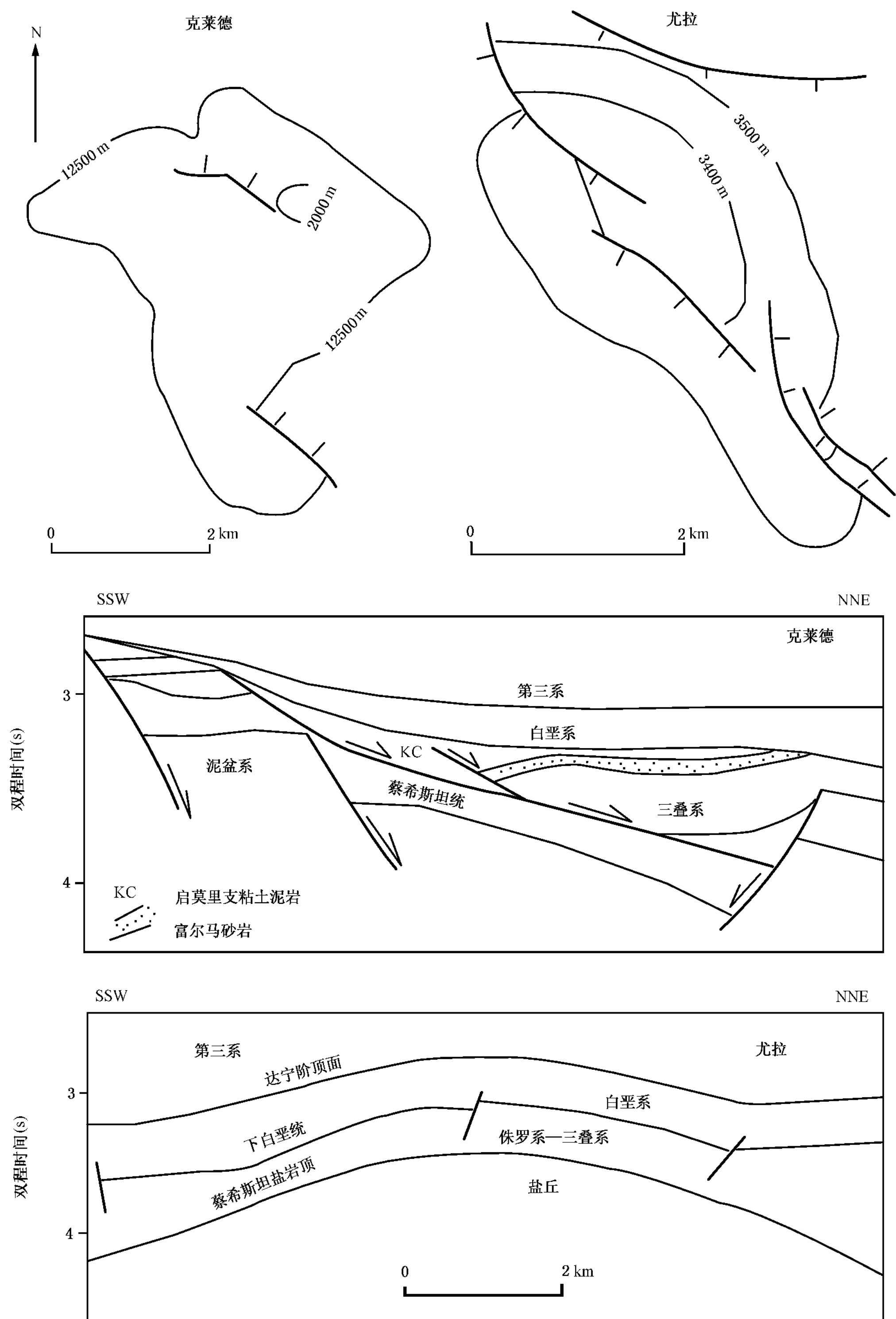


图 6－11　克莱德油田和尤拉上侏罗统油田

（引自 Gibbs，1983；Bailey 等，1981）

田的储集层。油藏圈闭在晚侏罗世形成的旋转断块中，盖层是上侏罗统至古新统的泥岩层系。一般认为该天然气是从维京地堑北部向东运移了一定距离储集于特罗尔构造的，这也是北海油气侧向运移难得的实际例子之一。

二、上侏罗统海底扇/浊流砂岩油气远景区带

晚侏罗世是断层活动强化期，导致了北海盆地明显的分异和裂谷系统的极化作用。在地堑的翼部经历了抬升和遭受强烈的地表剥蚀作用。在靠近地堑边缘断层附近堆积了裙边状的粗碎屑岩，向地堑中部急剧过渡为上侏罗统典型的富含有机质泥岩。

这个油气远景区带的最好实例是南布雷油田，在维京地堑南部的其他区域也有类似发现。以砾岩为主的储集层与活动断层有关，以砂岩为主的储集层与沉积斜坡共生，可以认为是复杂岩相组合的两种端点类型。南布雷圈闭主要受断层和地层倾斜闭合控制，圈闭最初形成于晚侏罗世至早白垩世，并以启莫里阶泥岩为顶部盖层，储集层由砾岩和砂岩组成，该地层沉积于向东伸入浅海的扇三角洲环境。以地垒块的持续隆起、海平面的上升和高速率的沉积物源，这3个因素的结合导致建造了巨厚的储集层系，它对于寻找具有商业性潜能的油气远景区具有重要的意义。在维京地堑南部的其他地区，这几个控制因素的组合导致粗碎屑物沉积在海底中。南布雷油田的储集层就是一个明显的实例。

具有重要意义的是已经认识到砾岩和砂岩为主的岩相都可由重力驱动作用，从盆地边缘向盆地中心作远距离的搬运，形成了新的地层型油气远景区带。Pickering(1984)曾在设德兰岛沿岸的上侏罗统露头中证实了这些作用的存在。

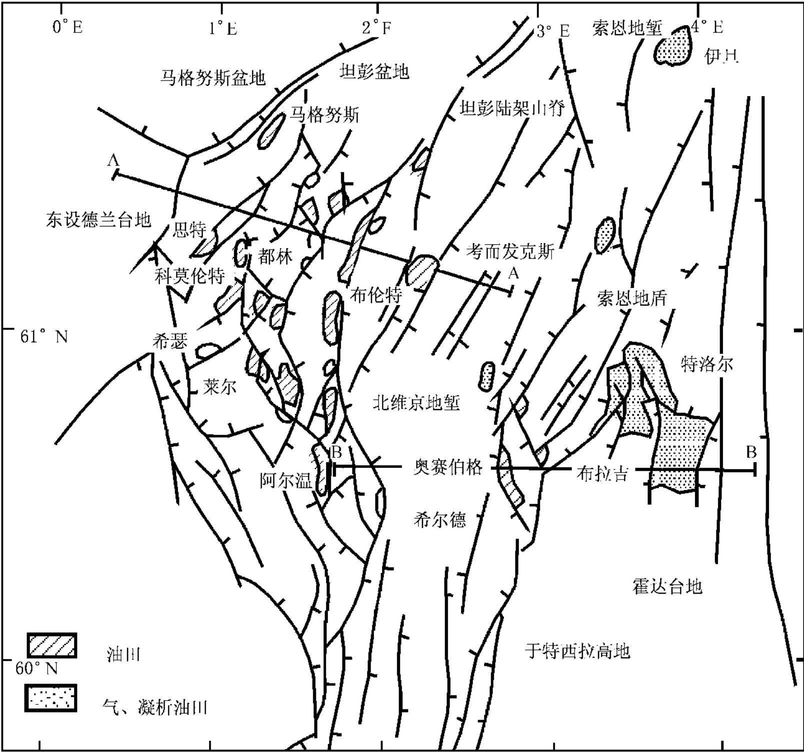
再向北，在东设得德兰盆地的北西边缘，马格努斯油田的储集层是由晚侏罗世一个水下扇沉积中保存下来的扇中端浊积岩所组成；扇体的近源部分随着北设德兰槽地的发育，被侏罗纪后的侵蚀作用剥蚀殆尽，马格努斯储集层似乎是从大陆棚区向西搬到深水区的再沉积，这也可能是维京地堑南部以砂岩为主而不是以砾岩为主的储集层的沉积模式。

这个油气远景区带明显地受晚侏罗世断层强烈活动位置的控制。然而沿断层走向多变的储集层特征与其特定的沉积过程密切相关，而沉积过程又受地垒抬升速率与盆地沉降速率之间的平衡关系所控制。另一个重要的因素是断层活动终止的时间及其对顶部盖层施加的影响。鉴于沿这些断裂活动的边缘勘探程度较低，因此，在北北海其他地区将找到类似布雷油田的油气聚集区是完全可能的。这类有利地带的逻辑外推也会引导人们去勘探盆地的更深处，寻找那些被搬运的粗碎屑所形成的浊流远端砂岩储集层。

第四节　中、下侏罗统砂岩油气远景区带

1971年布伦特油田的发现揭开了北北海油气蕴藏量最丰富的油气有利地带。主要储集层是冲积—海岸沉积相的斯塔福约德组砂岩，属瑞替阶至锡内莫尔阶的沉积。三角洲至浅海相的布伦特群砂岩，属巴柔阶至巴通阶的沉积，两者之间被都林组海相页岩所隔开。都林组也部分含有薄层砂岩。

图6—12标出了发现的主要油藏和凝析油藏的位置。这些油田大多数沿着北维京地堑和广阔的东设德兰盆地分布。不过在内莫里湾盆地和埃格桑盆地内也找到一些油气藏。除了晚侏罗世成熟生油岩分布状况的影响条件外，控制油气有利地区主要因素是储集层砂体的分布。斯塔福约德组砂岩只在布伦特、斯塔福约德和格尔法斯(Gullfaks)油田含油气，而布伦特群砂岩才是具有丰富储量的储集层。



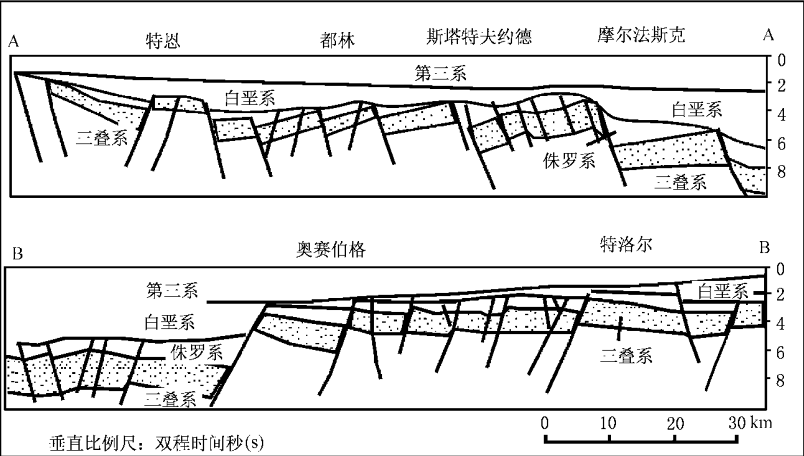
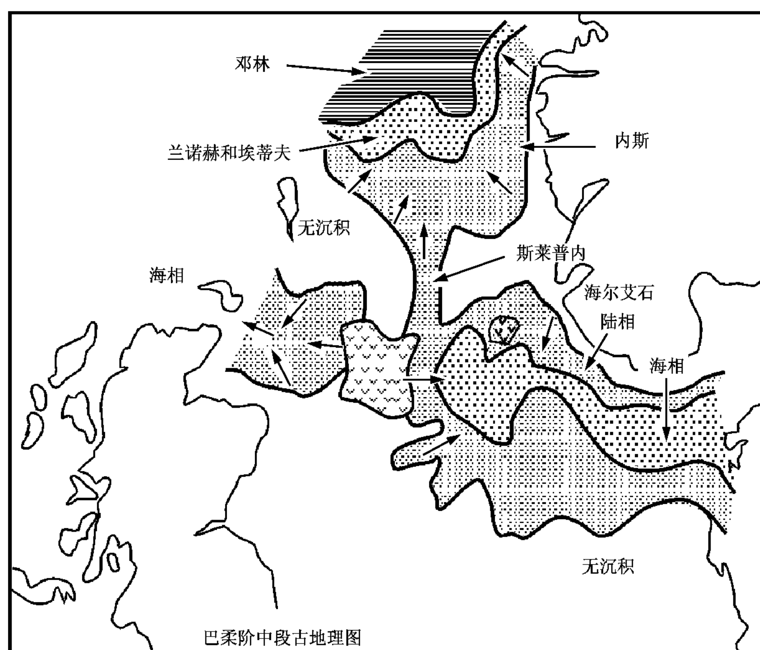


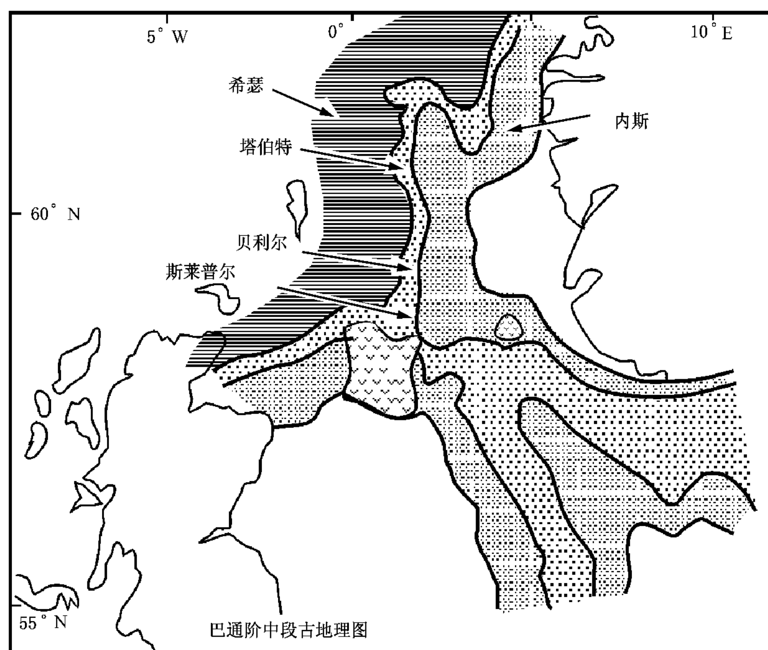
图 6－12　北维京地堑和东设得兰盆地大断层走向和主要油气田的位置

（引自 Challinor 和 Outlaw，1981；Brekke 等，1981）

一般认为布伦特群巴柔阶的瑞纳奇(Rannoch)、埃蒂夫(Etive)和莱斯(Ness)组是一个向北推进的三角洲沉积，而巴通阶的塔伯特(Tarbert)组砂岩是经海侵改造作用形成的沉积，发育最佳的储集层通常在瑞纳奇和埃蒂夫组。Skarpnes 等(1980)编绘的一张中巴柔阶和中巴通阶岩相古地理再造简图(图 6－13)，沉积走向大致呈东西的瑞纳奇和埃蒂夫组与呈南北走向的维京地堑和东设德兰盆地相直交限制了此有利地带的范围。来自主火山中心的巴柔期沉积物向西搬运到内默里湾盆地，向东，搬运到挪威荷兰盆地，但是这两个盆地中没有一个盆地沉

降速率与堆积速率是达到平衡的，因而导致了大三角洲的发育。其中一个有趣的解释是巴通





1 海相页岩

2 浅海砂体和三角洲前缘砂体

3 陆相和三角洲相砂岩及含煤页岩

4 火山岩

图 6—13 **北北海中侏罗统巴柔阶中段和巴通阶中段古地理示意图**

(**引自** Snarpnes **等**,1982)

期至卡洛夫期的海侵淹没了东设德兰台地，使得一条开阔的海岸带伸入了南维京地堑和内默里湾盆地，出现了改善储集层所需要的高能沉积环境。这与斯莱伯纳油田储集层地层特征是一致的，Larsen 和 Jaarvik(1981)将这个油田的卡洛夫阶储集砂岩(Hugin 组)解释为随着海平面上升的浅海三角洲环境沉积。Skarpnes 等(1980)也提出贝利尔(Beryl)油田的中侏罗统储集层也是这个海侵时期的沉积。

然而，应该注意的是对于中侏罗世古地理模式的建立，不同研究者可以不同。例如，Proctor(1980)提出布伦特群的主要沉积因素是默契松—斯塔福约德扇形三角洲，它从北部的陆块向南推进到东设德兰盆地。

除斯莱伯纳油田和古德伦(Gudrun)油田属盐丘构造外，这些中侏罗统储集层的圈闭机理都是旋转断块。这在有关章节已列举了其各种不同的典型圈闭的横剖面。断层于三叠纪(或更早)开始活动，并持续至侏罗纪末，在中侏罗世末期，断块脊背上升超出浪基面，遭受剥蚀，在晚侏罗世海侵期间断块又被淹没，随后在侏罗纪末期断块重新上抬遭受剥蚀；在海底上留下被剥蚀过的地貌高地，逐渐被白垩系泥岩前积超覆和覆盖。因此，部分油藏圈闭是属地层型的，顶部封盖层是晚侏罗世、早白垩世或晚白垩世泥岩。

在东设德兰盆地的主要油田沿走向南北和北东向、向东倾斜的断层带分布(图 6—12)，尽管也发育有些西倾的北北西走向断层，但没有发现商业性油气藏。在地堑东部的索恩(Sogn)大陆架上形成的西倾断层组为奥塞贝格油田和特罗尔油田提供了闭合条件。沿断层阶地的闭合，由倾斜岩层和次级交叉断裂组成。奥塞贝格油田就是这一类油气远景区带中的一个实际例子，圈闭形成于晚侏罗世，封盖层为下白垩统泥岩，两者均早于油气开始生成时间——白垩纪末期。Goff(1983)曾估算过在北维京地堑区生油高峰期是古新世，在东设得兰盆地直到渐新世才开始生油。在这一有利地区内的油气远景区带的控制因素都十分有利，即由于生油岩与储集岩非常靠近，估计运移效率很高，所生成油气的 20%～30%圈闭在侏罗系砂岩中。令人惊奇的是覆于主要构造之上的启莫里阶泥岩到近期才达到成熟，从翼部向下有希瑟(Heather)页岩夹在成熟的生油岩和储集层之间。Goff(1983)曾提出正在生油的生油岩与低压的布伦特群储集层之间存在着高压力梯度差。促使石油通过具有微细的有效连通孔隙的页岩夹层作侧向运移。然而，布伦特群储集层向斯塔福纳德组砂岩的石油运移，就不可能用这种方式解释。但是，频繁的断裂活动为这两个主要储集层间的油气二次运移提供了机制。也许这个较复杂的运移途径能够解释在有产能的布伦特储集层之下的斯塔福约德组为什么常常含水的原因。

在维京地堑内，由于第三系沉积的不断加厚，使启莫里阶泥岩在始新世进入湿气生成阶段。但没有证据说明有大量的天然气向西运移进入东设德兰盆地。在奥塞贝格油田存在的气顶和特罗尔气田的气，可能说明气是向东运移的。一个有趣的推断是，特罗尔气藏起初也是一个油藏，晚期(古新世)从顶部盖层产生了生物降解作用破坏了油藏，后来又被从维京地堑中运移过来的天然气所渗入，从斯莱伯纳向北至希尔德，再向北到埃旦都是气藏或为凝析气藏(见图 6—12)。凝析油比率变化较大，这可能主要反映了启莫里阶泥岩不同的成熟度和干酪根组分的差异。

在维京地堑以外的地区，在布雷姆和布里斯林已发现油藏，在埃格桑盆地中厚度较薄的波克勒姆组生油岩在埃格桑盆地和北荷兰槽地的 F/3 区块已局部达到成熟。向西在内默里湾盆地启莫里阶泥岩一般认为尚未成熟。然而 Barnard 和 Cooper(1981)提出，巴通阶的含藻油页岩可能是阿特里斯油田高蜡石油的母岩，巨厚的上侏罗统岩系(图 6—14)为中侏罗统达到成熟，提供了足够的埋藏深度。

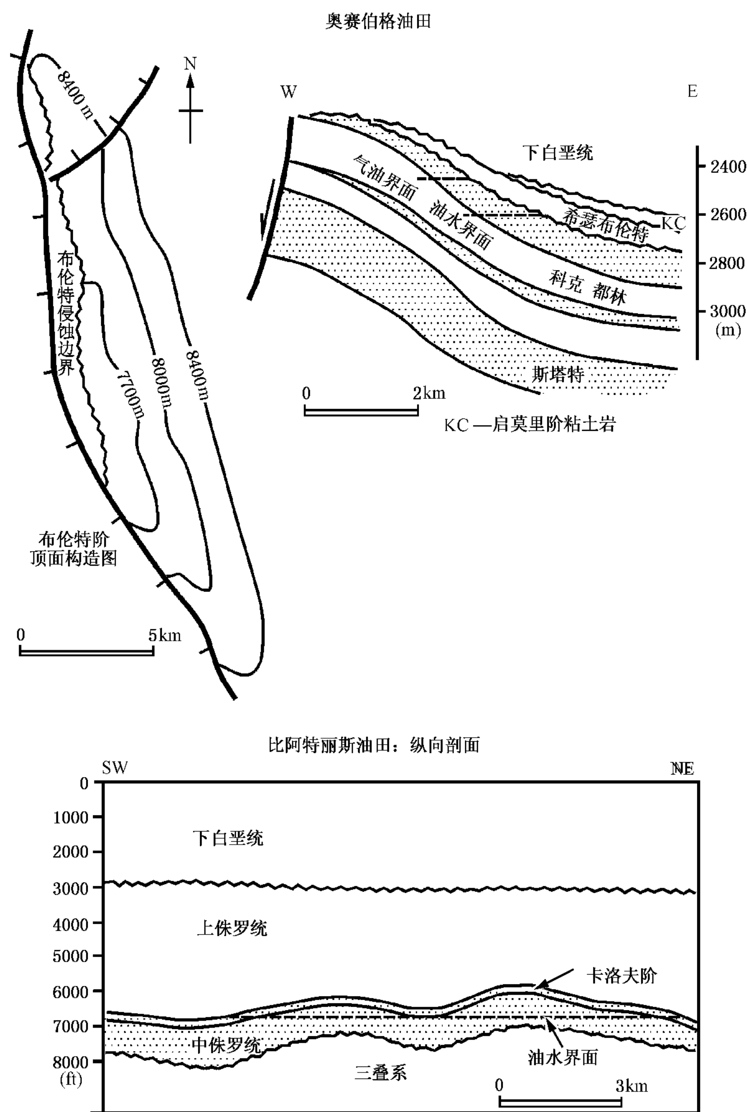


图 6—14　奥塞贝格和比阿特丽斯中侏罗统油田

（引自 Larsen 等，1981；Linsley 等，1980）

第五节　地堑边缘古生代油气远景区带

沿着地堑边缘断层的上升盘边缘和地堑中地垒块内，在二叠系和泥盆系储集层中找到了油藏。在这个油气远景带中，油是从上侏罗统生油岩运移至地层时代较老、又被构造抬高的那部分储集层中，在阿盖尔油田，主要含油储集层是蔡希斯坦统的晶洞白云岩与被一薄层铜页岩分离的赤底统风成相和河流相砂岩。同类储集层也出现在奥克油田，不过此处的赤底统砂岩大部分为含水层。造成中央地堑和奥克山脊构造发育的主要阶段是晚侏罗世的断裂活动，促使中央地堑与奥克山脊重新分异。然而，在晚白垩世断裂活动的进一步活化导致局部地区受侵蚀，造成上白垩统和达宁阶白垩岩成为这两个油田的顶部盖层。沿中央地堑和维京地堑最

外缘断层的晚期活动使该油气有利地带,形成的圈闭是一个相对年轻的构造,这对于晚期生油和油气运移来说同样是必不可少的条件。

该油气远景区带的有利地区,限于蔡希斯坦统白云岩连通孔隙发育程度好的地方。在奥克和阿盖尔油田中,被剥蚀的蔡希斯坦统边缘与原生致密碳酸盐岩和石膏层之间,保存了一个相对狭窄的被淋滤地带,那里石膏层经淋滤形成了高孔隙度和高渗透率。Taylor(1981)就认定这种苛刻的条件不可能导致类似储集层的普遍存在。

由于上侏罗统页岩仅在奥克山脊向西部地台边缘接近成熟,因此人们认为奥克和阿盖尔圈闭中的石油是从中央地堑内成熟的启莫里阶中生油岩的石油向西穿过边缘断层运移而来的。在阿盖尔油田,地堑边缘断层也是对圈闭的边缘遮挡。因而有理由认为断层既起着运移通道的作用,又起着封闭界面的作用,这种现象说明了断层的两重性。中央地堑的边缘不单由一条断层形成,而是由一组不连续的雁行排列的断层组成。这些断层的剪切运动势必会创造这样的条件,即生油岩与储集岩斜接在一起,发生横穿断层的油气运移。然而,单是这样一种解释是不充分的。启莫里阶泥岩与储集层间的接触面积是有限的,不可能达到高效率地运移油气,这也可能与围绕阿盖尔油田的侏罗系砂岩扮演了运载层的角色有密切关系,从而使该油田的蔡希斯坦统储集层中油气富集。

在上述两个油田中,赤底统砂岩小角度不整合,覆于泥盆系岩层之上。向北在本奇地堑的地垒块中,泥盆系老红砂岩本身构成了主要的含油储集层。该储油层由块状河流砂岩组成,渗透率一般小于 $1\times10^{-3}\mu m^2$,且常常小于 $0.01\times10^{-3}\mu m^2$。钻杆测试表明,由于裂缝极发育,有效渗透率达到 $50\times10^{-3}\mu m^2$。顶部由阿普第阶泥岩封闭。裂缝与本奇构造的发育相伴生,它是一个高幅度的拱顶地垒块,边界断层落差超过 304.8m。构造生长直到马斯特里赫特期才完成。然而,储集层之上是欧特里—阿尔比阶的下白垩统致密泥岩层系覆盖和封闭,表明构造高点始终在海平面之下。虽然油田面积小,但由厚储集层(约 610m)和高油柱(>550m)得到了弥补。

令人费解的是,Harms 等(1981)曾报导在南维京地堑和弗莱登高地山脊之间的断裂十分发育,泥盆系岩层却充当了南布雷油田的边部封闭层。

上述仅对北北海已知探明油气远景区带作了简述,尚有大量待发现的油气藏不可能以这种方式归类。不过所讨论的有利区带反映了油气探明储量的大部分的分布概况。图 6—15 展示了对有经济价值的油田以储集层类型为划分依据的北海油气储量分类表。

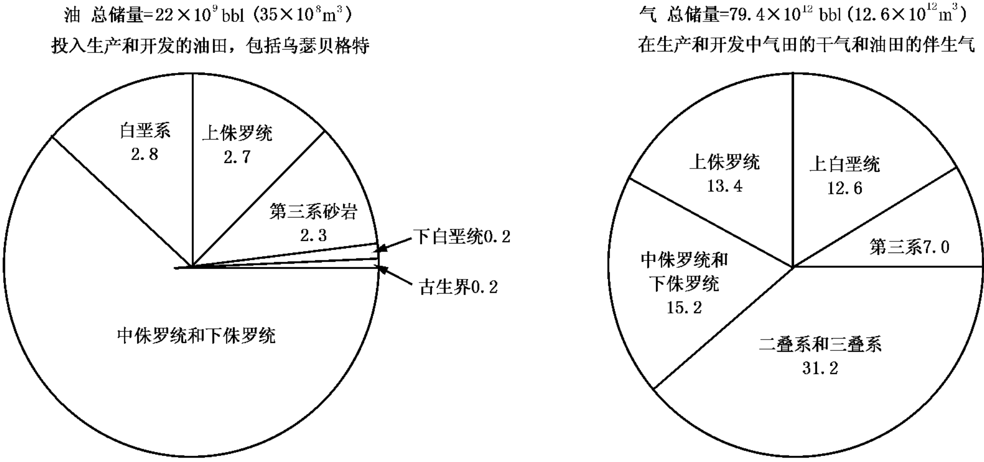


图 6—15 北海油气储量分布(按储集层分类)

据估计北海原油总储量接近 22×10^9 bbl(35×10^8 m^3)，其中主要部分蕴藏在北海北部的下侏罗统到中侏罗统的砂岩中。分析一下目前已在英属北海海域油藏的发现顺序，可看出油田的平均规模在下降，从约 500×10^6 bbl 降到 300×10^6 bbl(80×10^6 m^3 至 50×10^6 m^3)，并且近期获得的资料表明这种趋势将继续下去。

北海英国水域部分现已处于勘探成熟阶段，在生产石油的主要盆地绝大部分区块已经勘探到一定程度。但这并不意味着对那些尚未勘探过的地区缺乏产油潜力。远景有利地带概念的出现和随经济条件的改进可以开创那些从前被人忽视的和没有吸引力而放弃的区块开展勘探。例如英国已规划好的集气系统有可能激励人们钻探更深处的侏罗系气藏，这些主要蕴藏天然气的地堑轴部的勘探程度还处于较低的水平。另一个例子是地震解释人员正在开始支持北海地堑扩张起源的观点，结果也许在主要油气有利地带内能够圈出新的但规模大小不等的油气圈闭。

北海挪威水域的勘探形势不同，它主要在北纬 60°～62°之间的挪威水域，发现了具有诱人勘探前景的区块。而英国在同一纬度都没有找到重大油气田。此外，同英国水域一样，主要的勘探前景是寻找那些较小的和日益复杂的油气田。

早期发现油气藏的评价工作指明，勘探中最初认为是以构造圈闭为主的往往带有地层圈闭的成分。勘探实践表明北海的地层圈闭会日益显得重要，不过在这种高勘探费用、离岸较远、海水较深的环境下，勘探成功率取决于发展可靠的构造及地层圈闭模式。

第七章　油气田各论

北北海盆地分属于英国和挪威，还有一小部分属丹麦、荷兰，为了叙述的方便，按国别和所处的构造部位不同，分别选取其重要的油气田尽可能详述之。

由于几年前中国海洋石油总公司海洋石油勘探开发研究中心编译出版了《海上油气田勘探开发典型实例选编》第三集北海一书中详尽地介绍了尼尼安油田、埃科菲斯克油田、英属23/27区块、蒙特罗斯油田、帕普（也有人译为派帕）油田、哈利布特油田、锡斯尔（Thistle）油田、马格纳斯油田、伯瑞尔油田、塞尔马油田和布伦特油田等油气田的勘探、开发情况。另外在张子枢编写的《世界大气田概论》一书中也较详细地介绍了埃克菲斯克油气田、斯坦特福约德油气田及弗里格油气田的情况。因此，本章对上述两书中已叙及的油气田就不再赘述了。

由于大家都知道的原因，目前对北北海地区中已发现油气田报导较多的是英属海域范围的。挪威所辖海域中虽也发现了不少油气田，但公开报导的较少，因而仅能就现有情况，尽量予以叙述之。

现将北北海盆地中已发现的主要油气田列表如表7—1。

表7—1　北北海盆地油气田一览表

油气田名称	面积/km^2	产层时代	产层岩性	产层深度/m	原始可采储量/$\times10^8t$、$\times10^8m^3$	原油密度
马格纳斯（Magnus）	40多	晚侏罗世	砂岩	2800～3150	0.59（油）	API39°
布伦特（Brent）	64	早、中侏罗世	砂岩	2740～3350	2.5（油） 13（气）	API38° （0.83）
斯塔福约德（Statfjord）	168	早、中侏罗世	砂岩	2500～3000	4.9（油） 1450（气）	0.82～0.86
弗里格（Frigg）	115	始新世	砂岩	1800～1950	1（油） 2130（气）	0.91～0.916
尼尼安（Ninian）	80	中侏罗世	砂岩	2779～3179	1.7（油） 34（气）	
阿尔文（Aiwyn）		早、中侏罗世	砂岩	3200～3580	0.29（油） 266（气）	API27.8° ～50.80°
克莱莫尔（Claymore）		早白垩世、晚侏罗世、三叠纪、石炭纪	砂岩	2450～2650	1.8（油）	API25°～30° （0.90～0.87）
派帕（Piper）	32.20	晚侏罗世	砂岩	2194～2595	1.14（油）	API37°
伯瑞尔（Beryl）	约30	三叠纪—侏罗纪	砂岩	3000～3535	>1（油）	
锡斯尔（Thistle）	18	中侏罗世	砂岩	2700～2850		
哈里布特东北（E. N. Halbut）	20.3	中侏罗世	砂岩	3355～3554	>0.7（油）	API38°/42°

续表

油气田名称	面积/km^2	产层时代	产层岩性	产层深度/m	原始可采储量/$\times10^8$t、$\times10^8m^3$	原油密度
英属 23/27 区块	24.3	古新世	砂岩	3380	0.1(油)	
布雷(Brae)	90	晚侏罗世	砾岩 砂岩	3590～4800		
福蒂斯(Forties)		古新世	砂岩	2098～2250	2.56(油)	API37° (0.8398)
甘尼特(Gannet)		始新世 古新世晚侏罗世	砂岩	2410～2620	1.14(油) 282.5(气)	储层不 同各异
克莱德 (Clyde)		晚侏罗世 二叠纪	砂岩		2.2(油)	
阿盖尔(Argyll)		赤底世	砂岩	2628.9～ 2875.18(SS)	⩽0.01	
埃科菲斯克 (Ekofisk)	49	古新世 晚白垩世	白垩	2900～3280	1.4(油) 1870(气)	API36° 0.8443
阿尔布斯克杰尔 (Aibuskjell)	25	古新世	白垩	3050～3280	0.31(油) 672(气)	API44° 0.79～0.8 063
科德(Cod)	28.7	第三纪	砂岩	2860～3160	0.025(油) 83(气)	API44°～ 51°(0.8063 ～0.7753)
挪威 2/2 区块		渐新世 侏罗纪	砂岩			
塞尔马(Thelma)	17	古新世 侏罗纪、泥盆纪	砂岩		0.08	API39°
特洛尔(Troll)	770	侏罗纪	砂岩	1300～1350	1.36(油) 3.4(气)	0.882～ 0.910
奥丁(Odim)	40	始新世	砂岩	1950～2025	345(气)	0.83
英属 13/22 重油油田		早白垩世	砂岩	914.4		API17.6° (0.950)
斯卡巴(Scapa)		早白垩世	砂岩	2560	0.01(油)	
埃达(Edda)	10	古新世 晚白垩世	白垩	3036	0.006(油) 22(气)	0.83～0.84
埃尔德菲斯克 (Eldfisk)	18	古新世 晚白垩世	白垩	2700(Alpha) 2800(Brano)	0.07(油) 390(气)	0.84
霍德(Hod)	14	古新世 晚白垩世	白垩	2575(W. Hod) 2650(E. Hod)	0.087(油)	0.68

托木米利特（Tommeliten）	7（Alpha） 4.5（Gamma）	古新世 晚白垩世	白垩	3000 3025	0.013（油） 210（气）	0.77～0.85 0.78

续表

油气田名称	面积/km^2	产层时代	产层岩性	产层深度/m	原始可采储量/$\times10^8$t、$\times10^8$m^3	原油密度
托尔（Tor）	22	古新世 晚白垩世	白垩	2872	0.026（油） 120～150（气）	0.8155
尤拉（Ula）	11	晚侏罗世（牛津阶—启莫里阶）	砂岩	3345	0.036（油）	0.83
瓦尔霍尔（Valhall）	280	晚白垩世	白垩	2400	0.009（油） 10（气）	0.845
7/11—5	26	晚侏罗世	砂岩	4040	0.003～0.0143（油） 10～40（气）	0.83
布里姆（Bream）	20	中侏罗世	砂岩	2260	≤0.00143（油）	0.855～0.882
布里斯林（Brisling）	5	中侏罗世	砂岩	2120	≤0.00143（油）	0.888
巴尔德（Balder）	44	古新世 早始新世	砂岩	1650	0.0158～0.0358（油）	0.91
海姆达尔（Heimdal）	33	古新世	砂岩	2010	0.007（油） 695（气）	0.72
东斯莱普纳尔（Sleipnerst）	59 22	古新世 卡洛夫期（J$_2$）	砂岩	2260 2645	530（气） 70（气）	0.93 0.94
西斯莱普纳尔（Sleipnervest）	80	卡洛夫期（J$_2$）	砂岩	3375 3450	0.065（油） 1260（气）	0.79
15/5—1	8.3	晚侏罗世	砂岩	3380	0.0013（NGL） 0.2（气）	
久尔法克斯（Gullfaks）	35 15 10	中侏罗世 晚侏罗世 晚侏罗世	砂岩	1740 1785 1865	0.282（油） 0.017（油） 0.027（油）	0.88 0.85 0.83
海尔德（Hild）	120	中侏罗世（巴通期）	砂岩	3600	300～400（气）	0.82
默其松（Murchison）	17	中侏罗世	砂岩	2904 2956	0.073（油） 0.0286（NGL） 39（气）	0.83
肖罗尔（Shorre）	30 50	赫唐—辛涅缪尔期 早诺利克—瑞替期	砂岩	2300 2375	0.056（油） 0.31（油）	0.711～0.764 0.674～0.701
阿加特（Agat）	约150	晚阿尔比期	砂岩	2800	650（气）	0.78（凝析油）
布拉盖（Brage）	25 47 7.7	晚侏罗世 晚侏罗世 早侏罗世	砂岩	1990 2070 2300	0.0006～0.0176（油） 0.2143～0.05（油） 0.0006～0.029（油）	0.83 0.85 0.85

奥塞贝格(Oseberg)	不详	中—早侏罗世	砂岩	2120	0.29(油) 890(气)	0.857
福蒂斯(Forties)	90	古新世	砂岩	2098～2248	＞2.4(油)	0.84

续表

油气田名称	面积/km^2	产层时代	产层岩性	产层深度/m	原始可采储量/$\times10^8t$、$\times10^8m^3$	原油密度
贝里尔(Breyl)	21	侏罗纪 晚三叠世	砂岩		0.54(油)	API36.5°
都林(Dunlin)	60	中侏罗世	砂岩	2610～2910	0.41(油)	API35°
蒙特罗斯(Montrose)	62.2	古新世	砂岩	2400～2480	0.14(油)	API41°
希斯尔(Thistle)	16.1	中侏罗世	砂岩	2760～2990	0.69(油)	API38°
巴肯(Buchan)	15	泥盆纪	砂岩	2680～3200	0.068(油)	API34°
科莫兰特(Cormront)					0.15(油)	
丹(Dan)	80	古新世 晚白垩世	白垩		0.17(油)	
希瑟(Heather)		中侏罗世	砂岩	2900～3200	0.2(油)	API35°
奥克(Auk)		二叠纪	灰岩	2250～2360	＞0.1(油)	API37°
富尔马(Fulma)	12.6	侏罗纪	砂岩		0.7(油) 56(气)	API41°
比阿特里斯(Beatrice)	6.5	侏罗纪	砂岩	1780～2036	0.21(油)	API38°
赫顿(Hutton)	34	中侏罗世	砂岩	3000	0.34(油)	API32°～33°
莫林(Maureen)		古新世	砂岩	2490～2700	0.21(油)	API35.6°
塔尔坦(Tartan)	36.4	晚侏罗世	砂岩	2940～3600	0.27(油)	API37°～41°

北北海盆地目前已发现和已生产的油气田已达250多个，但多缺乏对每个油气田的详细报导，现仅就收集到的资料分英国、挪威和丹麦海域分别加以叙述。

第一节　英国所辖海域中的油气田

英属北北海盆地范围内已找到近百个油气田，除了已在专著中报导的以外，目前具有较详细资料者仅有阿尔文、克莱莫尔、斯卡巴、布雷、甘尼特、克莱德、阿盖尔和13/22区块重油油藏等油气田。

一、阿尔文(Aiwyn)油田

包括了北阿尔文和南阿尔文两个油田。该油田位于东设德兰盆地中南部的3/9和3/14区块内，在3/15区块边缘也包括油田的一部分。它位于北距布伦特油田约25km，尼尼安油田东东南约15km的地方，海水深度约130m。该油田发现于1973年，估算其石油原始可采储量达0.29×10^8t(含凝析油在内)，天然气为$266\times10^8m^3$。

该油田在构造上处于东设德兰台地和维京地堑轴间的一个中等断块上,其以排列成行的掀斜断块为特征(图7—1)。在东设德兰盆地切割侏罗系地层的最主要的断层方向与盆地的延伸方向基本一致。主要断层的发生、发展对盆地的沉降和沉积历史具有明显的影响。

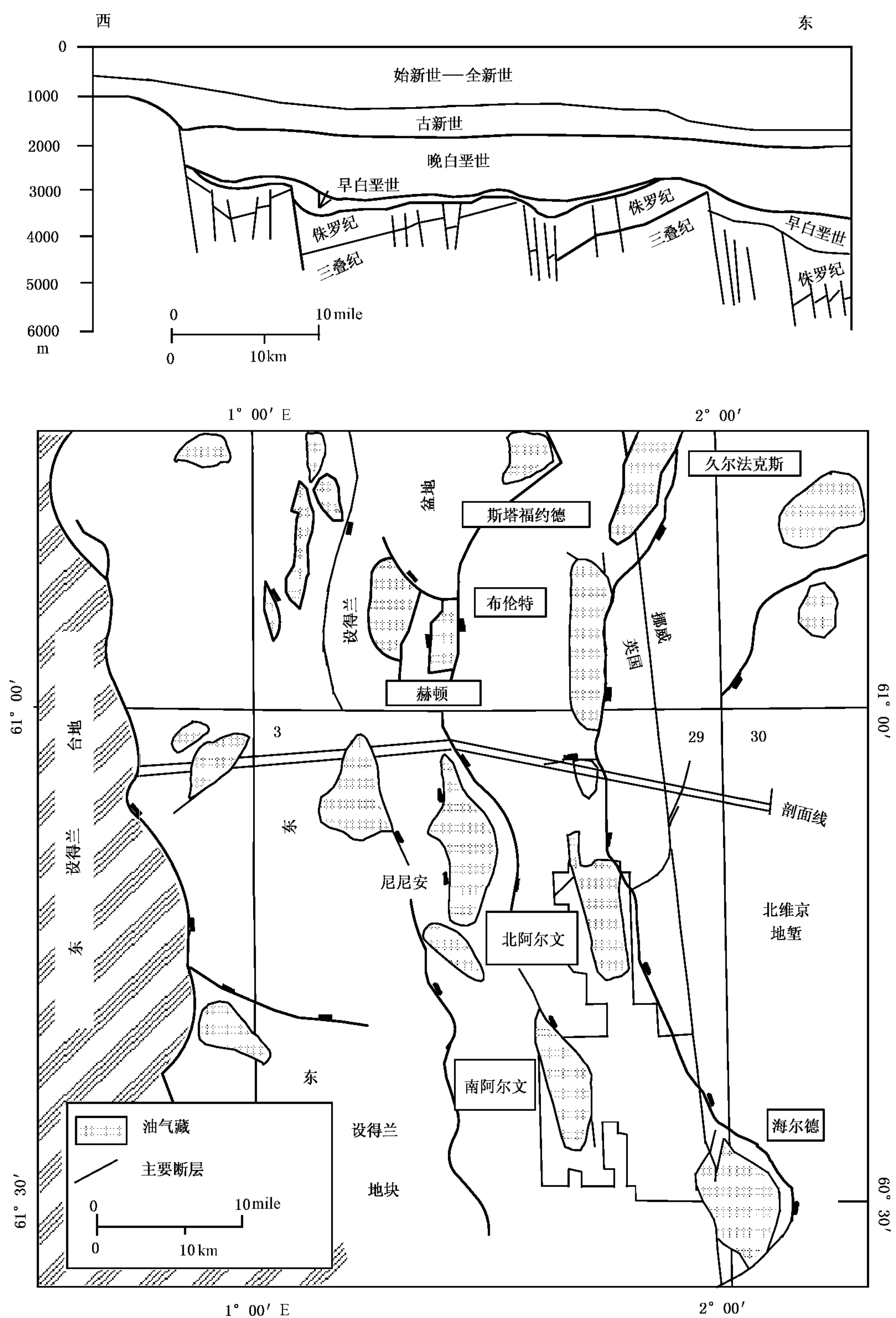


图 7—1　阿尔文地区白垩系底构造图及剖面图

阿尔文油田(或称地区)钻井深度一般只达侏罗系底部。下侏罗统斯塔福约德组由向上变细的充填河道砂岩及洪泛平原页岩组成,厚15～350m,以南阿尔文—尼尼安断层为界,西部厚度15～55m,东部厚度突然增大到150～350m,说明该断层当时是活动的。都林群为页岩,厚度30～450m,中侏罗统的布伦特群由下部的海岸浅海相砂岩,中部的三角洲砂岩、页岩和煤以及上部的海相砂岩组成,东部厚200～300m,西部变薄得很快,且发育不全,可能是因为后期侵蚀形成的(图7—2)。上侏罗统的希瑟组以浅海相页岩沉积为特征,厚约50～150m,其上的启莫里阶粘土岩组则为稳定的海相沉积,厚50～150m,该区主要白垩系底地震标志层是由相变组成的,从晚侏罗统低氧的封闭盆地粘土岩变为白垩系的钙质页岩,其后全区进入缓慢的区域热沉降阶段,以老的地堑轴为中心,沉积厚厚的白垩纪和第三纪的充填沉积。

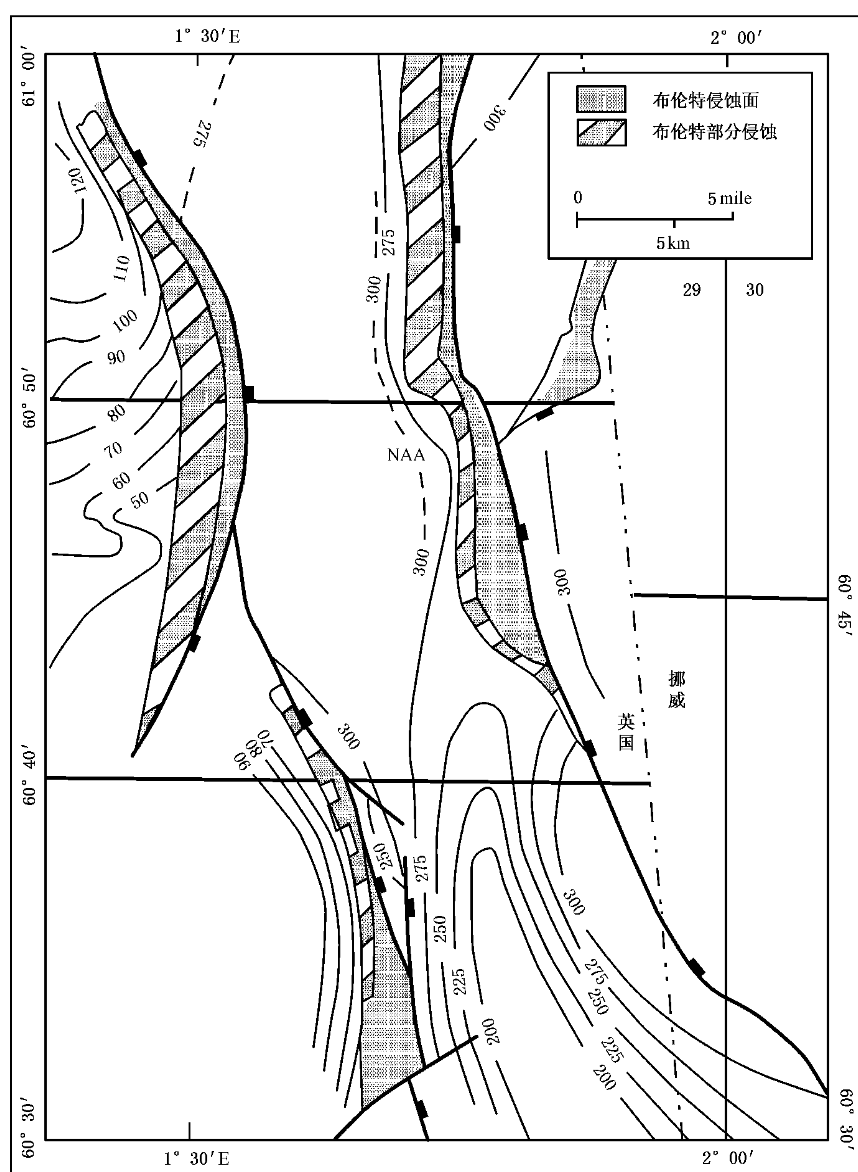


图7—2 阿尔文地区布伦特群等厚图(单位:m)

阿尔文地区储集层主要是布伦特砂岩及少量的斯塔福约德砂岩。从整体来看，布伦特砂岩平均孔隙度随埋深而减少，每百米减少约1.25%，由于沉积时原始孔隙度为35%～40%，这意味着在埋藏最初的3000m孔隙度只减少10%～15%。事实上，超过3000～3500m时，孔隙度每百米将接近减少1.5%，当然，砂岩中存在的石英次生加大以及伊利石和高岭石的出现，使储集层孔隙度降低并大大影响了它的渗透性。

阿尔文地区的源岩主要为上侏罗统页岩、布伦特煤及都林页岩，源岩的质量见表7—2。

表7—2 阿尔文地区源岩质量

层位	TOC(%)	烃类指数(S_2/TOC)(mg/g)	平均产能S_2(kg/t)
上侏罗统页岩	2—10	100～800	8
布伦特煤	60～70	20	200
都林页岩	1～7	212	4

阿尔文南部石油和源岩抽提物的比较表明，布伦特和斯塔福约德储集层中的石油似乎为来自各种源岩的石油混合物。从生储的关系上看，阿尔文地区的石油显然来自该区外侧断入深处的上侏罗统页岩以及储集层内部的煤及下部的页岩。

就北阿尔文油田而言，构造比较复杂，在白垩系底不整合面之下，侏罗系地层以7°～11°倾角向西倾斜，并为两个方向的明显断层所切割，一个为朝东下降的南北向断层系统，另一为多条成东西向或北东东一条南西西的横断层(图7—3、7—4)。由于断层的切割，北阿尔文油田可分为5个石油聚集区(图7—3)，圈闭是由侵蚀截顶和倾斜以及断层交叉的微妙结合形成的。

(1)油田北西布伦特储集层油气聚集区(3/9—1)。

这个石油聚集区西北部为地层倾斜所限，东部和南部为断层所限，北部为复杂断层带所限。

(2)油田东部布伦特储集油气聚集区(3/9—1)和(3/9—4)。

向西倾斜的布伦特石油储集层其东部为上侏罗统页岩所截切，其南部，圈闭由地层倾斜形成，而其北部，聚集体分为两部分且为复杂断层带内的侵蚀或断层所限。

(3)油田北部布伦特储集层油气聚集区(3/4—8)。

朝西倾斜的布伦特石油储集层圈闭在一条主要的南北向断层的东部，其北部缓倾斜地层保证了圈闭的形成，而其南部复杂断层带又为其提供了障壁。这个聚集体的油—水界面较之直接位于断层带另一侧的布伦特北西聚集体高出90m。

(4)南西布伦特储集层油气聚集体(3/9—3和3/9—6)。

这个聚集体，像上面描述的那些，因倾斜而靠近西部，更朝北，一条小断层提供了障壁；而其东部和南部，地层倾斜、断层和倾伏侵蚀面的复杂相互作用限制了聚集体的规模。

(5)斯塔福约德储集层聚集体(3/4—6和3/9—5)。

这个聚集体构造最为简单，为西部的倾斜断层和东部的侵蚀截切所限，其南部，倾伏侵蚀面和断层的结合提供了圈闭机制；而其北部复杂断层带再一次成为障壁。

在布伦特群储集层中(图7—5)，260～290m厚的布伦特组较之北阿尔文油田中最大的油气柱高度(120m左右)要大得多。这样油气几乎限于上布伦特群(塔伯特组)和中布伦特群的

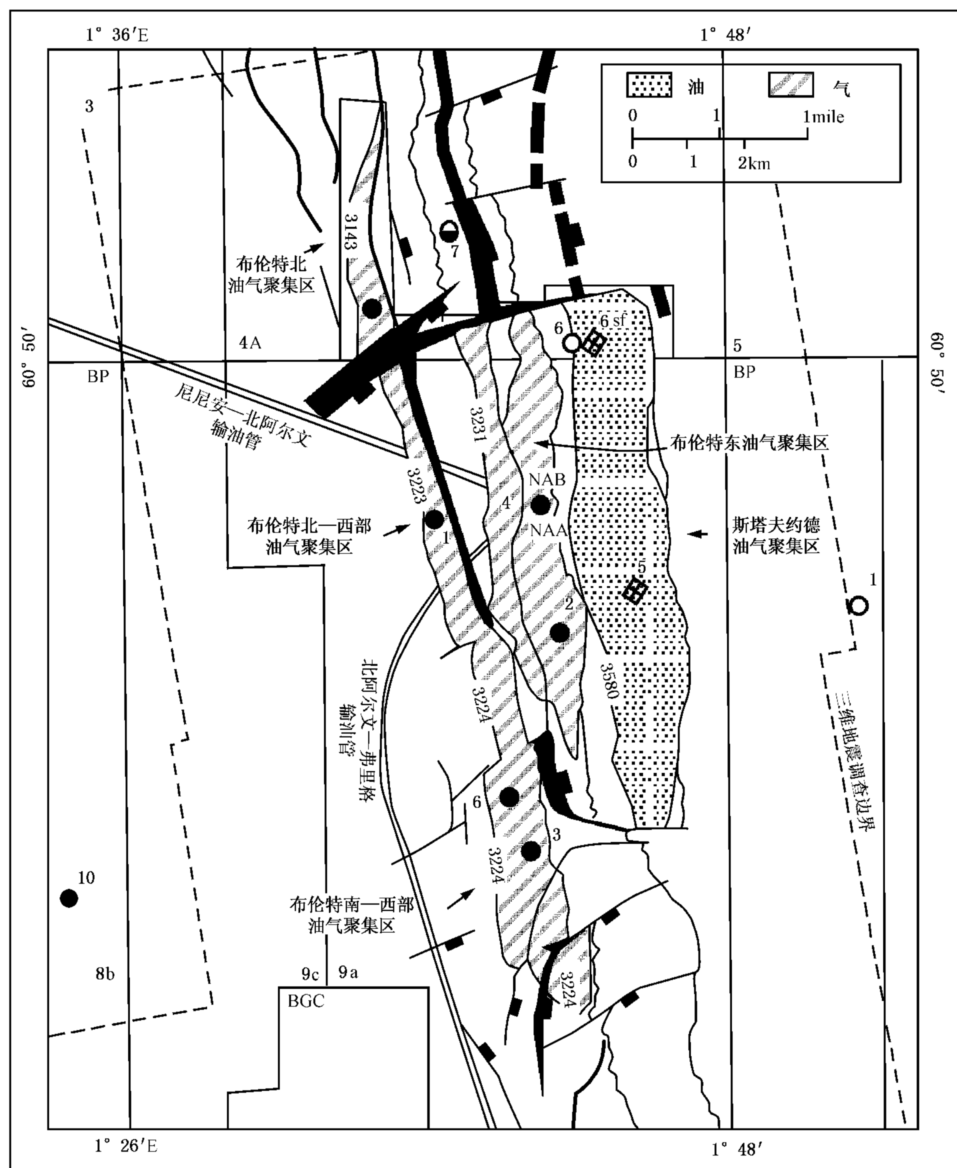


图 7－3　阿尔文地区的石油聚集区分布图(单位:m)

上部(莱斯组二段)。

塔伯特组进一步划分为:①海进的基底砂岩(厚 6～11m),分选差,中到极粗粒;②沉积于滨外—砂坝环境的细粒的、分选良好的云母砂岩(厚为 10～22m);③分选差细到极粗粒向上变细的块状砂岩(厚 37～52m)。

莱斯组二段主要由向上变细的河道砂岩和向上变粗的水道砂坝及决口扇沉积组成,该砂岩在井间不能对比,因此,意义较小。

除了石英外,布伦特储集层的主要成分为岩屑、长石(碎屑和自生的),高岭石和硅质次生加大以及云母。块状砂岩孔隙度为 21%,但在云母砂岩和基底砂岩中要低一些。块状砂岩和

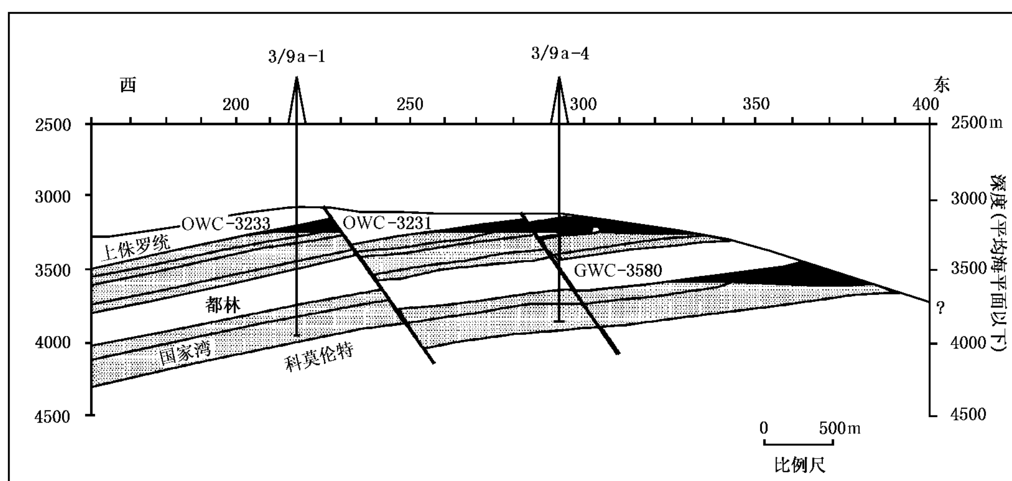


图 7—4　北阿尔文油田横剖面图

基底砂岩的渗透性良好，几乎所有的测量值都落在 $100\times10^{-3}\mu m^2$ 和 $1\mu m^2$ 之间，而云母砂岩渗透率要小得多，但其测量值极少小于 $1\times10^{-3}\mu m^2$。

斯塔福约德储集层的厚度也略大于气柱的高度(290m)，可以分为块状的和互层状的两个单元。块状的斯塔福约德砂岩厚 80～100m，变化不大，砂岩与页岩比率接近 90%；互层状的斯塔福约德单元砂岩及页岩的比率大约为 50%，厚度在 160～200m 之间变化。孔隙度在互层状岩石中为 17%～18%，较之块状岩石(15%～16%)略大一些，而平均渗透率后者为 $70\times10^{-3}\mu m^2$，比前者大得多。

对于该地区的油气运移情况可以北阿尔文油田的油气分布状况分不同储集层加以分析说明。斯塔福约德储集层含天然气和凝析油，对源岩成熟度的研究表明，维京地堑在中新世达到天然气成熟阶段，当天然气从该地堑向东设德兰盆地运移时首先遇到了多孔的斯塔福约德储集层。

布伦特储集层石油的来源可能更为局限，石油从西和南向上倾方向移动。启莫里阶粘土岩组在阿尔文地区井中正好处于油窗阶段，但这些井都位于构造高点附近，向两翼上侏罗统源岩朝下倾方向变厚，而且在渐新世末就开始成熟了。布伦特南西聚集体从石油连续变为天然气而没有出现界面，可以解释为两种来源的混合物，石油来自西部而天然气经断层带来自东部。

晚白垩世以来当较深处的源岩达到油窗阶段时，在维京地堑深处，产生的石油变成了什么呢？因在阿尔文地区斯塔福约德天然气藏下面没有发现石油残余物，如果石油首先运移，然后为时代更新的天然气所替代，是应该可以见到残余物的，未见的原因可能它在发生运移之前就裂解为天然气了。

在阿尔文地区中的布伦特储集层的资料表明(表 7—3)，在靠近油水界面的石油(40°API、GOR $325m^3/m^3$)，逐渐变到储集层顶部的天然气和凝析油(48°API、GOR $1138m^3/m^3$)，特别在南西布伦特聚集体中表现明显，令人特别感兴趣。这种现象的出现，可能与整个储集层中流体的不饱和与没有明显的油—气界面有关。所作储集层流体模拟实验表明，储集层中流体不饱和的临界深度位于大约为 3160m 的地方。

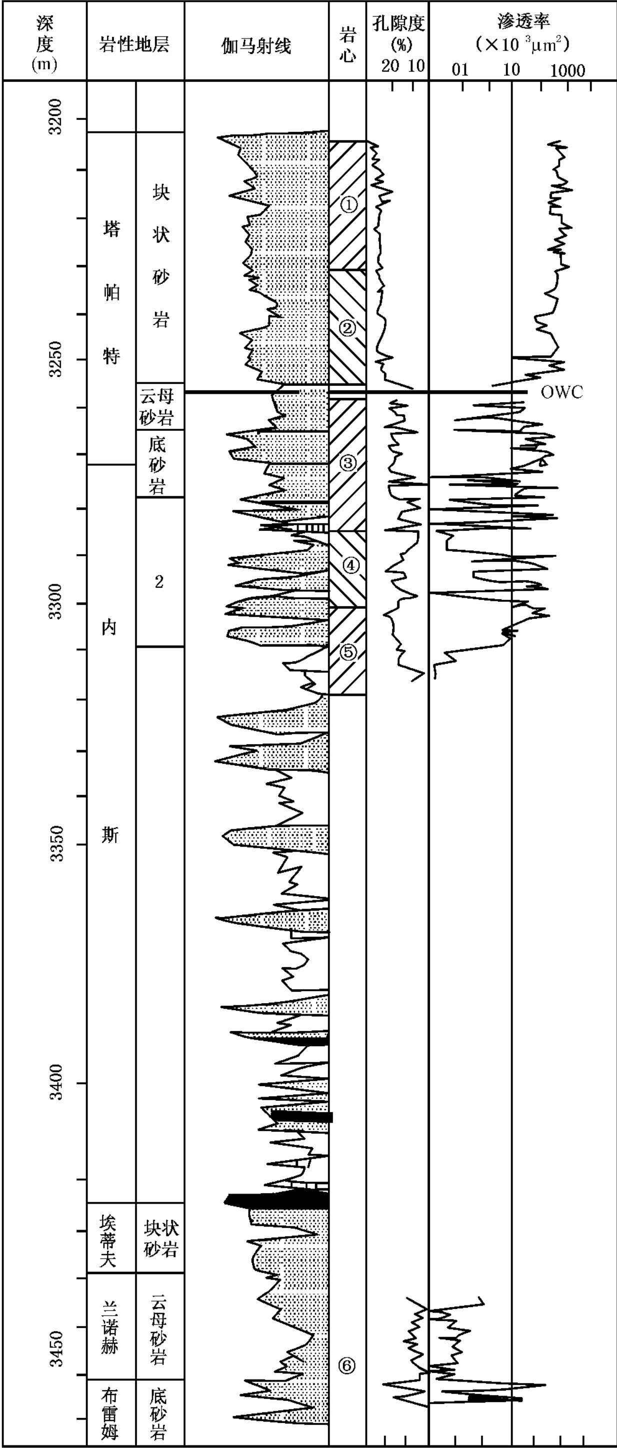


图 7—5　北阿尔文油田布伦特储集层典型柱状图

表 7—3　阿尔文地区油田储集层资料

	布伦特东（石油）	布伦特北西（石油）	布伦特西（石油）	布伦特西南（石油与天然气）	斯塔福约德（天然气）
	3200m	3200m	3200m	3200m	3200m
原始储层大压力/bar	450	450	441	450	495
温度/℃	113	113	111	113	119
HC—水界面/m	3213	3233	3143	3224	3580
液体重力/°API	37.8	39	42.7	41～48	50.8
GOR/(m^3/m^3)	195.7	306.4	238.7	325～1138	1900
FVF	1.63	1.95	1.68	2.05～3.5	285
饱和压力/bar	270.1	318.7	268.4	325～440	410

二、克莱莫尔(Claymore)油田

克莱莫尔油田位于英国的 14/19 区块内，距苏格兰阿伯丁 177km。第一口井钻于 1972 年，1974 年钻到了厚达 184m 含油砂岩。该油田原始储量 1.425×10^9bbl(约 2.03×10^8t)，分布于 3 个区内(图 7—6)：①克莱莫尔的主区，上侏罗统砂岩含油，占 65%的潜在的原始储量；②克莱莫尔北区，下白垩统砂岩含油，占 32%的潜在储量；③克莱莫尔中区，二叠系碳酸盐岩和石炭系砂岩含油，占 3%的潜在原始储量。到 1986 年 9 月 1 日累积产量和日产量分别为 0.39×10^8t和 12430t。

构造上克莱莫尔油田位于外默里湾的威其格朗德地堑(WGG)的西南边缘，正好处于 WGG 东北边缘的派帕油田的镜像位置。区内以断裂发育为特征。在上二叠统蔡希斯坦盆地蒸发岩和碳酸盐岩沉积之前，加里东和海西断层线切过低起伏的石炭系三角洲沉积，局部的断裂活动影响了后来三叠纪陆相粉砂岩和页岩以及河流砂岩的分布和保存，无沉积或侵蚀时期以上覆的晚侏罗世海陆交互相砂岩、页岩和煤的底部低角度不整合为代表，晚侏罗世海侵随陆架到三角洲边缘砂岩和粉砂质页岩的沉积而推进，同时 WGG 裂谷作用达到最大程度的发育，形成厚厚的浊流砂岩、粉砂岩和页岩。克莱莫尔主区和中区块体在晚侏罗世发生南南西向旋转，其地层在侏罗系砂岩底部向南倾斜 25°±，而在顶部向南倾斜 10°±，块体旋转随着侏罗系砂岩局部的重力滑动和峰部的侵蚀(图 7—7)。

在侏罗纪和白垩纪之间，曾出现一次大的海平面下降，使克莱莫尔中区—主区块体向南旋转了 3°，大规模的断层活动和断块旋转导致了克莱莫尔构造高部位，主区西部边缘和北区部分地区上升为陆地遭受侵蚀，侵蚀下的沉积物沉积在邻近的低地，纽康姆期的一次海平面上升体随着克莱莫尔主区和中区进一步向南旋转 6°，而且形成一超覆层序，早巴列姆期当海水在断块上倾方向推进时，这个超覆层序让位于剖面的变薄(图 7—8)。

随着下白垩统砂岩的沉积，大规模的构造活动基本结束，开始了平缓的盆地沉降，形成一套灰质泥岩、页岩的沉积和晚白垩世的白垩岩组的沉积。在第三纪沉积了大约 1829m 厚的砂岩和页岩。并伴随着第三纪沉积中心向油田的南东方向迁移。

克莱莫尔主区的储集层由晚侏罗世亨伯群的 3 个碎屑单元组成，亨伯群代表了沉积于 WGG 裂谷作用阶段的海侵层序，底部单元为牛津阶的 Sgiath 组，它广泛分布于整个 WGG，与派普油田的同层位砂岩可以对比，由海陆交互相的细到中粒次长石砂岩及互层状的碳质页岩

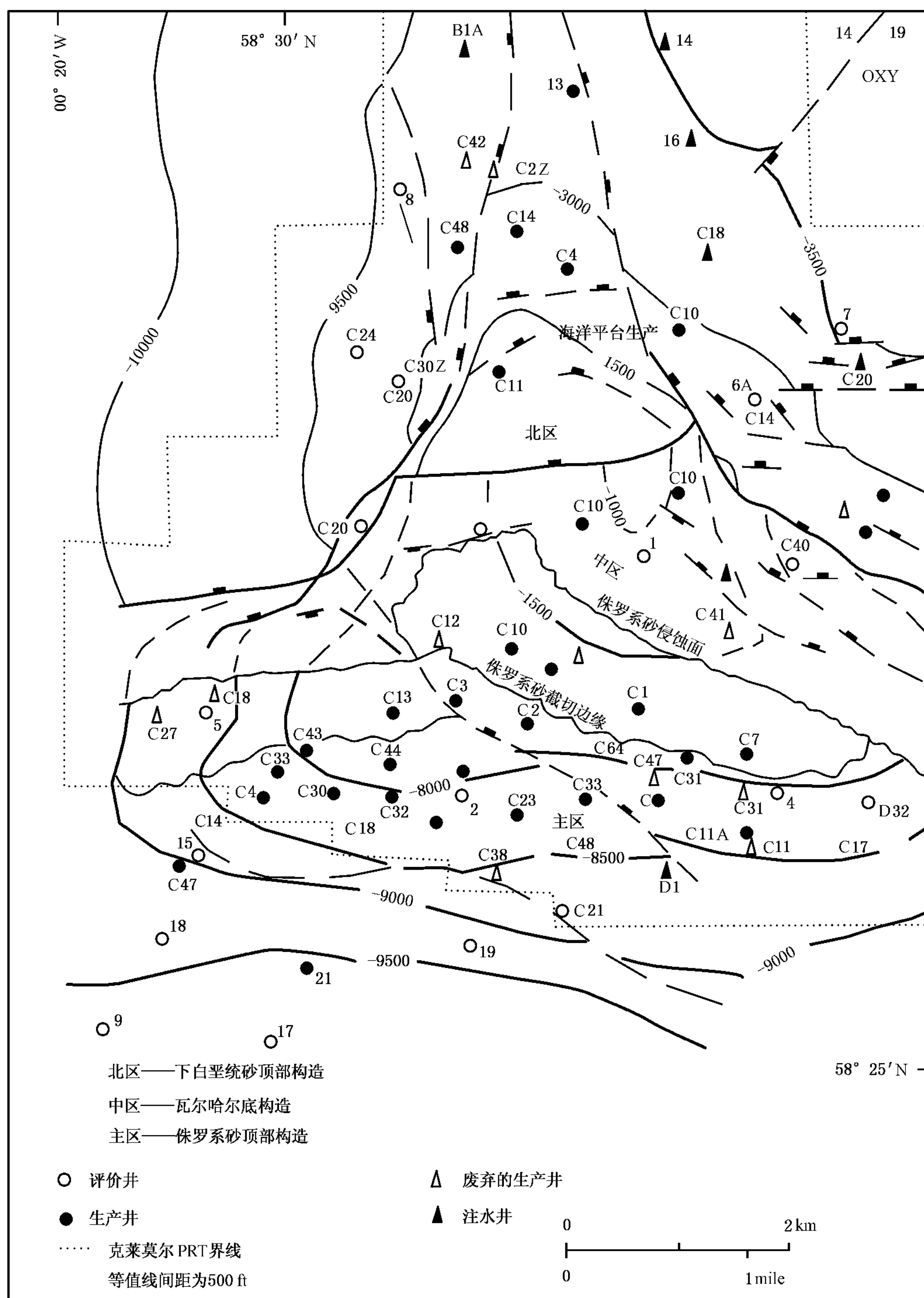


图 7－6　克莱莫尔油田上侏罗统顶面构造图

和煤组成，厚 6～37m，孔隙度为 15%～23%，渗透率为 30～600×10^{-3}μm^2。晚牛津期到启莫里期派普组以海相“向上变粗”的碎屑层序为代表，厚 15～57m，储集性能极差。晚启莫里期到中伏尔加期的克莱莫尔砂岩段，是主要的储集层，由细到极细粒次长石浊流砂岩组成，含薄层状富有机质粉砂岩和粉砂质页岩，在南部最大厚度达 497m，而在北部则被截切。可以非正规

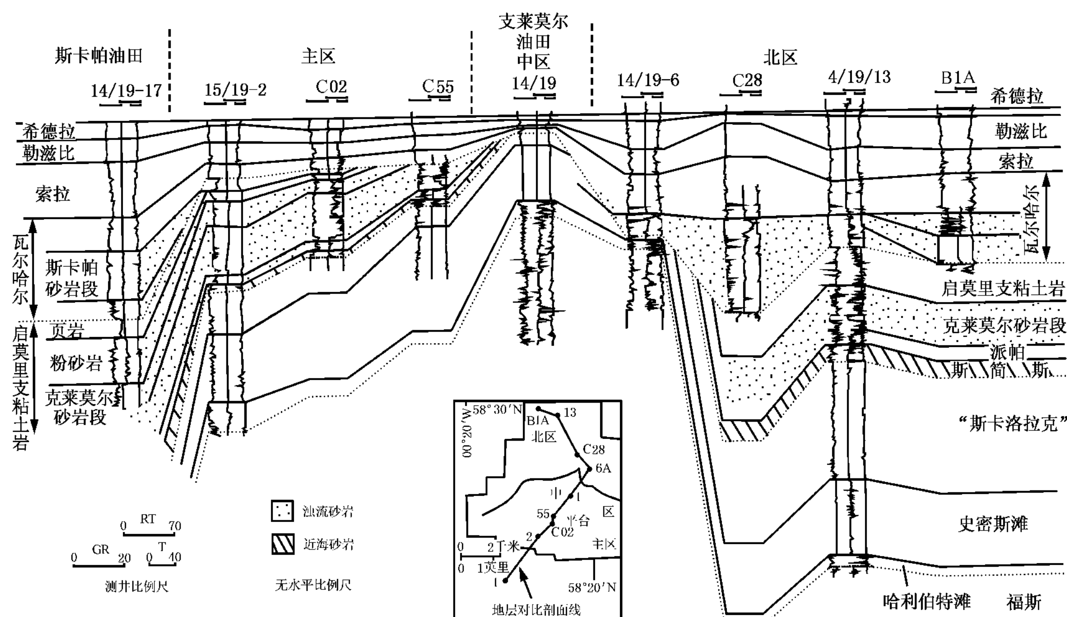


图 7—7　克莱莫尔构造钻井横剖面对比图

地将储集层分为低伽马射线砂岩(LGRS)和高伽马射线砂岩(HGRS),而且在整个克莱莫尔主区都可以进行对比,LGRS 孔隙度 12%～29%,渗透率 $1300\times10^{-3}\mu m^2$,单层厚 0.5m;HGRS 孔隙度 10%～27%,渗透率 $0.2\sim400\times10^{-3}\mu m^2$,单层厚平均为 0.2m。LGRS 储集性能显然较好,LGRS 为小规模水道浊流砂岩,一般成透镜体,难于作井间的对比。浊流能量大小显示出随时间进程总体减小,从而降低了储集性能,能量大规模的降低出现于 LGRS 沉积结束时,随后沉积了 HGRS。启莫里阶页岩是克莱莫尔油田的主要源岩,在克莱莫尔构造较深部位以及构造周围低凹处,启莫里阶页岩都已达到主要的生油阶段,克莱莫尔油田主区的盖层主要为启莫里阶粉砂岩和页岩,但其北部和东部截切边缘则为纽康姆海侵形成的灰岩和灰质泥岩。

克莱莫尔油田北区储集层为下白垩统砂岩层,主要由细到粗粒钙质浊流砂岩和薄层状灰质泥岩、钙质页岩和瘤状铁质结核灰岩组成,厚度 0～139m,储集层由下部的“块状砂岩”和上部的“薄层状砂岩”组成,前者储集性能好,孔隙度 20%～30%,渗透率 $100\sim400\times10^{-3}\mu m^2$,代表广布的块状浊流沉积。“薄层状砂岩”局限于西北部边缘,为薄层状浊流水道砂岩和放射性页岩,孔隙度 18%～25%,渗透率 $20\sim500\times10^{-3}\mu m^2$,纽康姆期海侵形成的灰质泥岩和灰岩,成为上述储集层的盖层。

克莱莫尔油田中区石油产自石炭系煤系中的砂岩和二叠系蔡希斯坦统的碳酸盐岩。煤系以福思组的砂岩、页岩和煤组成的三角洲层序,而蔡希斯坦统则以哈里巴邦克组的富盐沉积的灰岩、白云岩和硬石膏为代表。福思组砂岩为细—粗粒,该组砂岩和页岩之比为 0.3,储集性能差,孔隙度 14%～23%,渗透率为$<0.1\sim500\times10^{-3}\mu m^2$,基本不能满足生产要求。哈里巴特邦克组具储集性能的沉积物局限于克莱莫尔油田顶部区域,可以应用地震资料将其圈出。由于空洞、裂隙和晶间孔隙的网络联合差异,因而其储集性能变化很大,孔隙度为 2%～19%,渗透率 $2\sim899\times10^{-3}\mu m^2$,总的来看,经济意义不是很大。陆相的三叠系沉积物整合于该组合之上,由于后期的抬升侵蚀,最终的盖层还是纽康姆海侵时形成的半深海灰质泥岩和灰岩。

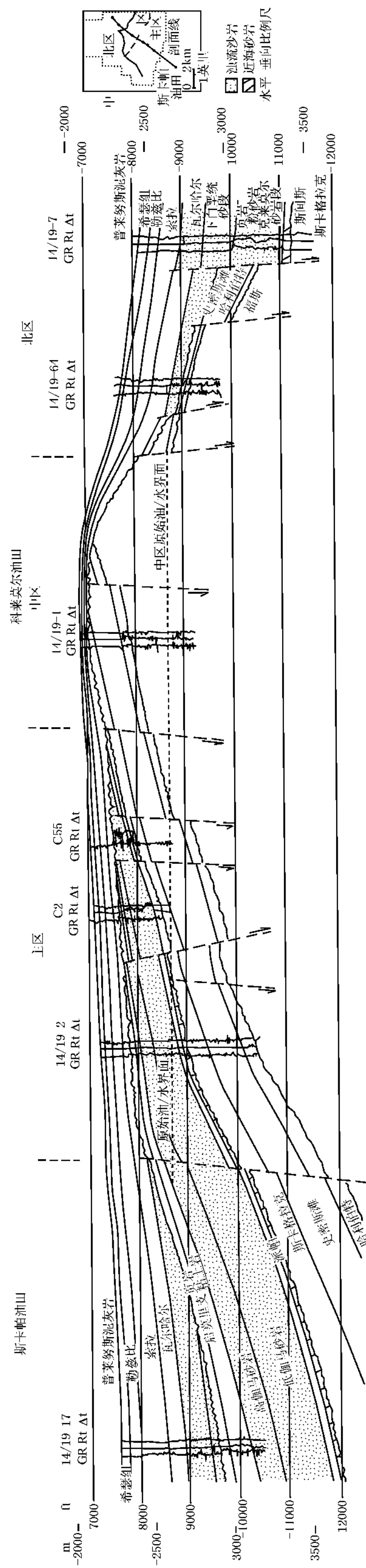


图7-8 克莱莫尔构造横剖面图

三、斯卡巴(Scapa)油田

斯卡巴油田位于北海英国辖区阿伯丁东北 180km 处,该油田发现于 1975 年,1985 年投产。油田开发使用了回接在克莱莫尔主平台上的综合生产/注水海底基盘系统,初步估计原始储量为 1×10^4t。目前的油产量大约是 3860t/d,是紧靠克莫尔油田南部的一个小油田。石油从 4 口生产井中采出。该油田共钻了 7 口评价井。

斯卡巴油田构造上位于一个东南—西北走向的向斜中,下白垩统储集层向北面的克莱莫尔高地超覆尖灭。油田的西面和东面以断层为界。

油田的储集层平均埋藏深度约 2530m,由一般厚度为 30 多米的下白垩统斯卡巴砂岩组组成。砂岩一般为细—中粒,为浊积成因,渗透率平均约 $200\times10^{-3}\mu m^2$。储集层剖面的特点是有大量方解石胶结结核,厚度变化大,最薄处仅有 0.3m 左右。

斯卡巴砂岩组有 2 个储集层单元,即上储集层单元和下储集层单元,这两个单元的部分压力相互连通。上储集层单元出现在整个油田而下储集层单元仅限于油田的西部。上储集层单元含有的原油约占该油田原始地质储量的三分之二,是该油田早期开发的主要目标。这里主要描述上储集层单元的地质概况。

上储集层单元的构造图是依据斯卡巴砂岩组顶部的地震反射进行作图的,该构造在油田的大部分地区没有受断层破坏。在整个油田斯卡巴砂岩组顶部和顶部储集层间的非储集层层段是不同的,这种储集层的横向易变性,只能通过详细的钻井剖面对比来进行。确定储集层的连通性只能完全依靠测井资料。测井对比表明单层没有可能从一口井延伸到另一口井(一般井间约相距 910 多米)。但对于下储集层单元和上储集层单元之间的划分,测井资料是非常明显的,这是由于在它们之间被平均 60m 厚的泥灰岩和灰岩层分隔开了。

该油田实际上属于克莱莫尔油田南部(翼部)的地层超覆油藏。下白垩统斯卡巴砂岩不整合在上侏罗统启莫里阶页岩之上(参见图 7—8),其油源很明显是来源于启莫里阶页岩,由于斯卡巴砂岩的横向变异性和储集层的连通性差,这就限制了该油田的分布范围,也增加了勘探开发的困难。

该油田的成功开发应归功于综合所有新资料的多学科的通力合作。通过不断地进行地质、地球物理和工程研究,制定了最优化的开发方案,这一切成果的取得都是基于对常规观念的改变。

四、布雷(Brae)油田

布雷油田是英国北海的主要油田之一,面积约 $24.3km^2$,最大油柱高达 490 多米,该油田发现于 1977 年,从 1983 年 7 月开始生产以来,到 1986 年 7 月已生产了约 143×10^4t 的石油和液化天然气。

该油田位于南维京地堑西部边缘的英国 16/7a 区块内,邻近弗拉顶格朗德(Fladen Ground)山嘴(图 7—9)。储集层序由上侏罗统砾岩、砂岩和泥岩组成,统称布雷组。该储集层序是一种海底扇沉积,但通常认为的海底扇模式并不完全适用于布雷油田,它似乎为一个受构造影响较少的扇体系的近端部分。

维京地堑可能形成于早二叠世,但直至前古新世还发生周期性活动,在地堑边缘沉积了厚度超过 3050m 的晚侏罗统和白垩系地层,其中近一半的厚度为布雷组沉积。在它之下为另一套沉积层序,可能包括了位于泥盆系之上的中侏罗世—二叠纪沉积物,这与黑登格朗德(Haden Ground)山咀泥盆系基底上覆的中生代沉积不同,且相对较薄,大约厚为 305m(图 7—10)。

图 7—9　英国 16/7a 区块布雷油田区域背景

图 7—10　布雷油田构造横剖面图(位置参见图 7—9)

邻近布雷地区,地堑边缘走向大致成南北向,并出现少量北东向分支,且由向东倾斜的高角度正断层组成,在油田构造顶点上两侧有一断距达 60m 的反向断层,切过布雷砂岩组的顶部,形成一小型地堑(见图 7—10)。

在布雷油田区施工的钻井较多,而且大部分钻孔都完全取心,这为确定该油田的复杂地层关系和分析沉积环境打下了良好的基础。布雷油田的储集层为布雷砂岩组,在油田区域内,该组为启莫里阶粘土岩组所包裹,且与之成交互关系(图 7—11)。布雷组的最大厚度达 760m,但从油田西部向东厚度变小直至尖灭。该组地层主要是灰—灰褐色,中—粗粒砂岩和砾岩,见有少量灰黑色半深海相泥岩与细粒浊流砂岩。在这些沉积物中可以识别出 6 个相。

(1)相 1 为砂基质砾岩,碎屑为砾级到大砾级,含分散的漂砾,基质为细—粗粒砂岩,含瓣鳃等海相化石,这是由高密度砂质砾状碎屑流形成的。

(2)相 2 为泥基质角砾岩,碎屑分选差,几乎完全为棱角状砾级大小的石英长石砂岩,基质由各种砂质泥岩组成。这是由断层形成的断崖上崩落的碎屑物进入泥质基底经混合,流动沉

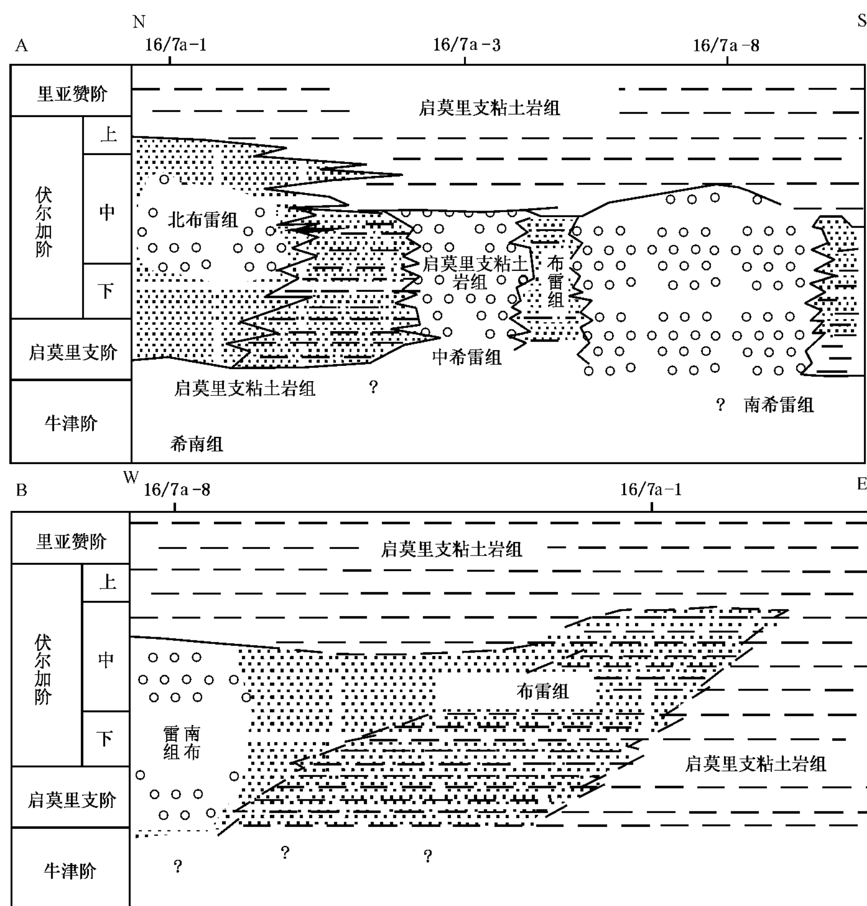


图 7－11　布雷油田区上侏罗统和白垩系最下部的地层关系

积形成的。

（3）相 3 为中厚层状砂岩，细—极粗粒，由高密度浊流沉积而成。

（4）相 4 为薄层状砂岩和砂泥岩互层交替组成。砂岩占该相的 50%～80%，其余部分为泥岩。它是相 3 和相 5 间的过渡层。砂岩由数量不定的低密度浊流沉积而成，层的界线一般成突变，表明泥岩部分属半深海沉积。

（5）相 5 为薄层相间的泥岩—砂岩，泥岩占 50%～80%，泥岩由半深海沉积而成，而砂岩由周期性的低密度浊流沉积而成。

（6）相 6 为纹理状泥岩，见有少量的薄砂层，主要是半深海的产物。

这 6 种相存在一定的共生关系，即相 1 和相 3 的共生，相 3、相 4、相 5 的共生，相 6 和相 2、相 5 的共生。主要为砾岩的相 1 和相 6 砂岩的厚层段（一般 30～90m）与其他较细粒相之厚层单元（大多数为 15～60m）交替出现。一般显示出明显的向上变细，这是布雷组地层纵向上变化的明显特征。在横向上砾岩向远端将变成砂岩，这已被钻井所证实。相 3 砂岩主要覆于相 5 和相 2 的泥基质角砾岩之上。该区布雷组的沉积环境被认为是受构造影响的，特别是表现在海底扇的近端部分非常明显，而且生产钻井也证明各种相成明显的侧向垂向排列（图 7－12）。

可以看出，该油田区内布雷组所有的沉积相都是海底重力流或半深海沉积形成的，相的几

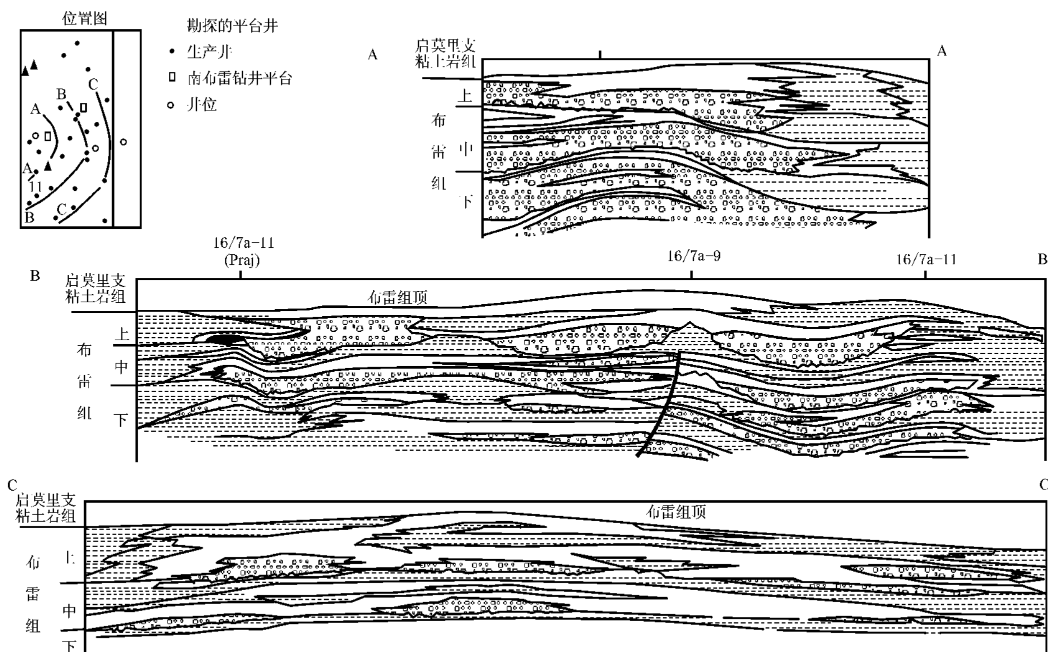


图 7—12　穿过布雷油田不同地层的海底扇剖面

何形态与海底扇近端部分一致。油田的南北端以扇状边缘的粗粒沉积物被页岩圈闭为特征。东端受构造的控制，且独自从近端的砾岩扇状沉积过渡到砂质中扇沉积和页岩质的盆地沉积。油田的西端为地堑边缘断层体系，与之相对的为砾岩扇顶，沉积物输入主要位置最可能是南北向和北东东—南西西向断层的交切位置。

该油田储集层布雷组可分为 3 个次级单元（上、中、下 3 部分），在这 3 个次级单元中，沉积相的侧向关系为沉积模式的建立起了重要的作用。布雷组下部厚度变化很大（0～360m），在其顶部一段中含油厚度达 140m，一般仅为 30 多米。布雷组中部厚度变化不大，一般厚为 120m，全为油层。布雷组上部厚度一般达 90m 左右，也全为油层。在油田中一般油层厚达 250 多米，最厚 490 多米，整个油层由西而东逐渐变薄直到尖灭。

对该油田的勘探，是一个充分应用沉积模式开展工作，并不断扩大油气远景的典型实例。沉积类型，相对厚的粗粒和细粒沉积物层序，以及复杂的侧向相变，决定了布雷地区的油气分布的预测开始是困难的。但随着勘探开发程度的不断提高，第一手资料的丰富，对沉积相组合的认识也变得更为清楚，从而使沉积模式的建立更接近客观实际，因而，现在已完全有把握用沉积模式圈出储集单元。

五、甘尼特（Gannet）油田

甘尼特油田位于福蒂斯（Forties）油田以南大约 60km 的地方，地理坐标为北纬 57°10′东经 0°48′到 1°左右。它由 5 个小油田组成：中央甘尼特油田、北甘尼特油田、南甘尼特油田、东甘尼特油田和西甘尼特油田（图 7—13）。该油田是由 Shell/Esso 公司在 1972—1982 年间发现的，并于 1981—1984 年间得到验证，总共打了 20 多口井，并作了三维地震调查。油气储量估算为 800×10^{6} bbl（约 1.14×10^{8} t）的原油和凝析油以及 1×10^{12} ft^3（约 283.2×10^{8} m^3）的天然气（以湿气为主）。

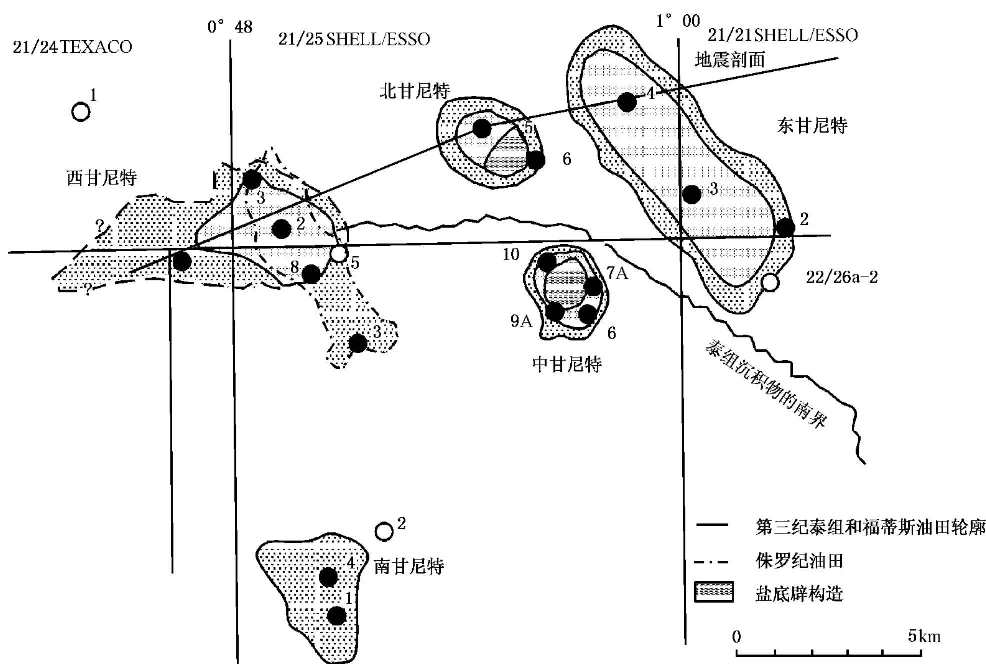


图 7—13　甘尼特油田位置图

甘尼特油田构造上位于西北中央地堑的西部边缘，该区正好处于从地堑充填沉积很厚向西部过渡到较薄的台地盖层的地方，构造型式以盐构造和张性地堑断层为主。

甘尼特油田群一共有 3 个储集层，它们是上侏罗统的法尔马砂岩，古新统的福蒂斯砂岩和始新统的泰砂岩，详细的地震、沉积和生物地层的研究可以综合归纳成相应的 3 个储集层的地层模式（图 7—14）。

上侏罗统富尔马组不整合覆盖于三叠系斯卡吉拉克组之上，向上逐渐过渡到启莫里阶粘土岩组，富尔马组由受生物强烈扰动的细粒到极细粒砂岩组成，由于广泛的生物扰动使原生沉积构造少见。岩心和测井曲线可以识别出富尔马组中两个主要储集单元，一个粗些，分选较好的可渗透的Ⅰ单元，它可进一步细分；另一个为泥质较多，几乎不能渗透的Ⅱ单元，这些储集层单元在油田范围内很容易进行对比（图 7—15）。

富尔马组中的储集层Ⅰ单元，可再细分为 3 个次级单元（图 7—16），Ⅰ1 单元由细到极细粒的泥质砂岩组成，生物扰动以水平潜穴为主，局部保存少量的原生沉积构造，碳酸盐胶结，厚度 1.2m 左右。I_2 单元由细粒、分选中等的纯砂岩组成，以含有充填粘土的潜穴为特征，该单元储集性能最好，孔隙度为 16%～22%，空气渗透率为 $10\sim2000\times10^{-3}\mu m^2$。$\mathrm{I}_3$ 单元以细粒到极细粒、受生物强烈扰动的砂岩为特征。富尔马组中储集层Ⅱ单元由极细粒的泥质砂岩组成，具有充填粘土的小型水平潜穴和大量的粪粒，使得沉积物呈似圆粒结构的特征，该单元的下部出现各种双壳类介壳印模。根据海相化石的存在及大量的生物扰动构造，富尔马砂岩被解释为浅海相沉积。

在甘尼特西部，根据测井曲线和岩心资料，可以将富尔马层序分为 3 期，被认为是海退建造。富尔马层序的下半部，伽马射线曲线、密度曲线成漏斗状，由Ⅱ单元泥质砂岩组成，向上变粗成为砂质含量较高的、分选较好的I_3 单元。II_2 单元良好的纯储集层测井曲线近似成圆柱形，反映砂体发育最好。富尔马层序向上变细，逐渐向上过渡到启莫里阶粘土组的低能陆架沉积。

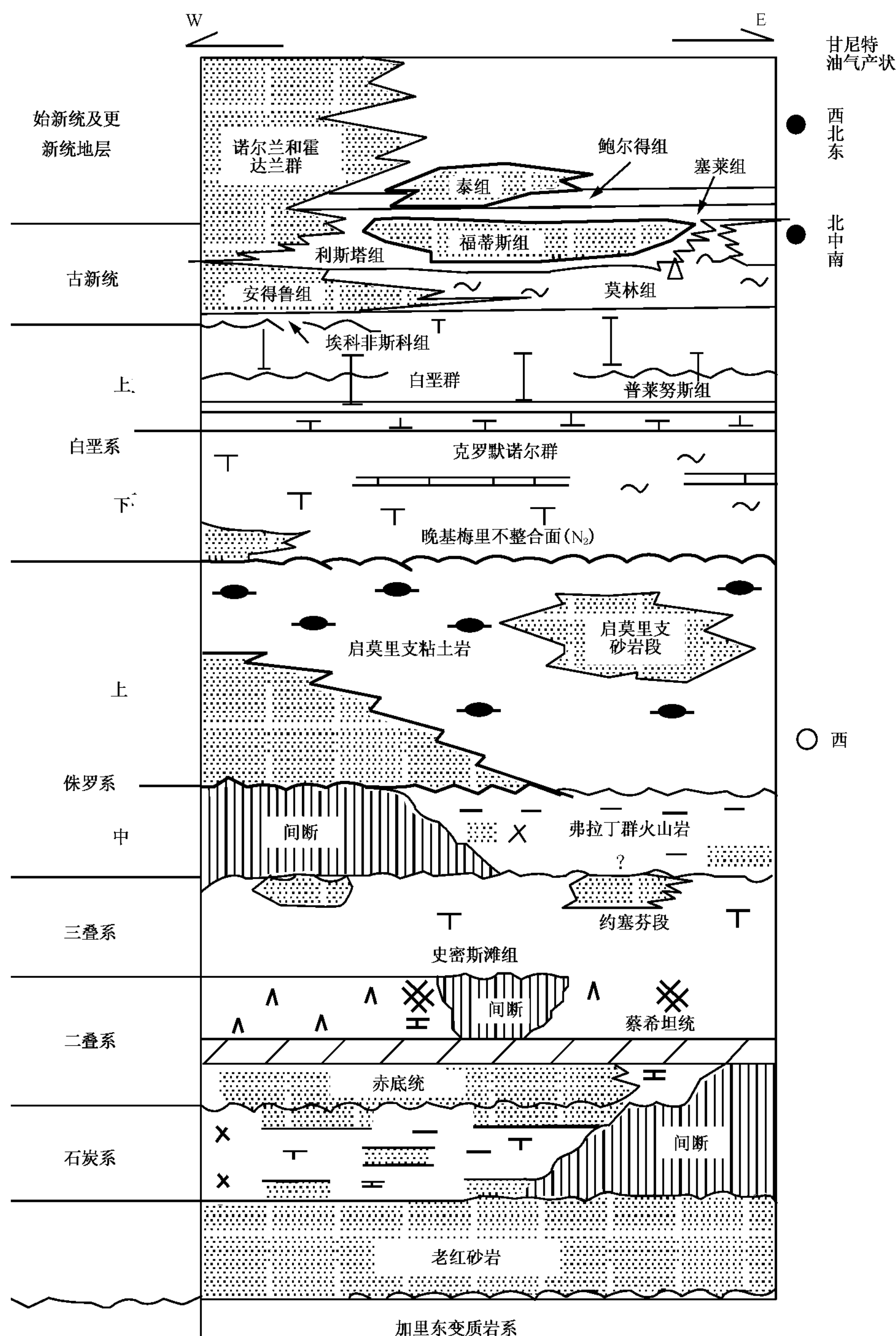


图 7—14　甘尼特油田综合地层及储集层剖面图

上古新统福蒂斯组是以砂岩为主的层序，在地震剖面和测井曲线上，其顶部是一良好的标志层，与塞莱(Sele)页岩界线清楚，而其底部因岩性是渐变的，而难以反映出来。其与里斯塔(Lista)页岩界线呈渐变关系。在甘尼特油田群内，福蒂斯组呈似席状分布，但在组内存在着明显的相变。根据详细的古生物学研究资料，可以近一步分为4个年代的地层段(图7—17)。福蒂斯组是一个来自西南部的深海扇体系，可以识别出内扇、中扇和外扇。内扇发育于西南

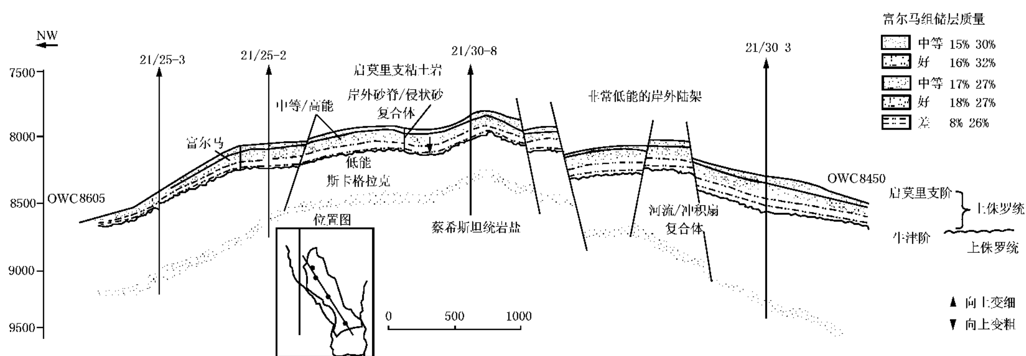


图 7－15　西甘尼特的构造横剖面图(表示出储集层的岩石组分及其特征)

部,纯砂岩厚/总厚比达 0.6～0.7,以厚的水道砂岩为特征。块状砂岩储集性能优良,孔隙度达 38％,在甘尼特南部测得的空气渗透率 650～2800×$10^{-3}\mu m^2$。中扇层序发育于甘尼特地区中部,在数层块状砂岩内具有高的纯砂岩厚/总厚之比(0.7～0.9),可以识别出一系列推进的“上扇”朵叶体,呈向上变粗及变厚的旋回特征。页岩层厚度小于 1.5m,侧向延伸有限,砂岩的储集性能非常好,例如在甘尼特中区,平均孔隙度为 2.6％～31％,渗透率为 153～423×$10^{-3}\mu m^2$。外扇/扇边缘层序主要发育于该区的东北部,以相对较薄的浊积砂岩和较低的纯砂岩厚/总厚比(0.6～0.65)为特征,出现数个次要的向上变粗、变厚旋回(扇朵叶)或向上变细、变薄层序(次要水道充填物),页岩可厚达 9m,且具有大的侧向延伸特征,砂岩储集性能中等(图 7－18)。

泰(Tay)组由深水海底扇层序组成,代表了几个推进的扇沉积的速续叠合,形成了厚达 300m 的砂岩。3 个独立的海底扇沉积作用,形成下、中、上 3 个砂岩单元(图 7－19),中间被称作“巴尔德(Baldar)页岩单元”和“上部泰页岩单元”所分隔。“下部砂岩”由块状细粒砂岩组成,它们在甘尼特北部形成下部储集层单元。“巴尔德页岩单元”代表盆地页岩沉积层序,它以细纹层状的黑色粘土岩和远端的浊积砂岩的互层开始,逐渐变为具有生物潜穴的,红色和绿色的粘土岩及粉砂岩,该单元的出现代表了下部、中部砂岩间扇沉积作用的长时期终止。向上“中部砂岩”由海底扇沉积层序组成,以大规模的变粗变厚层序为其特征,代表了扇体推进的主要阶段。在东甘尼特含水的中部砂岩得到很好的发育,但向西,砂岩体厚度减薄。东北甘尼特盐底群构造也影响砂岩的发育,进入该构造顶部,这个储集层单元变薄尖灭。“上部泰页岩单元”位于中部和上部砂岩之间,厚度变化不大,为 15～35m。由细纹层状灰绿色页岩组成。“上部砂岩”代表泰砂岩扇沉积作用在甘尼特油田群内的最后阶段,这个单元成为西甘尼特和中甘尼特的两个主要的泰油气储集层。西甘尼特地区被主要的内扇水道复合体所占据,它位于两个突起的同沉积盐构造形成的高点之间,纯砂岩的厚度厚达 45m。就储集层发育和分布而言,泰砂岩的变化对西、东、北甘尼特油田的储集层地质具深刻的影响,但对每个油田的影响基本上又是不同的,主要是沉积环境和同沉积盐运动的变化造成的。

甘尼特油田群各个油田的石油地质存在较大的差别,中甘尼特油田为一个围绕狭窄的刺穿盐底辟构造的圆形倾斜圈闭(图 7－20)。发现井于 1982 年钻在该构造的东南边缘,发现了含油气的古新统福蒂斯砂岩,进一步钻探证实和圈定了盐穿刺的存在,并发现在构造顶部缺乏储集层。福蒂斯储集层既含油也含气。虽然难于评价盐底辟构造的侧向延伸范围,但已应用地震和测井资料,加之 VSP 测量技术,圈出其分布范围。中甘尼特油田福蒂斯组以砂岩为主,

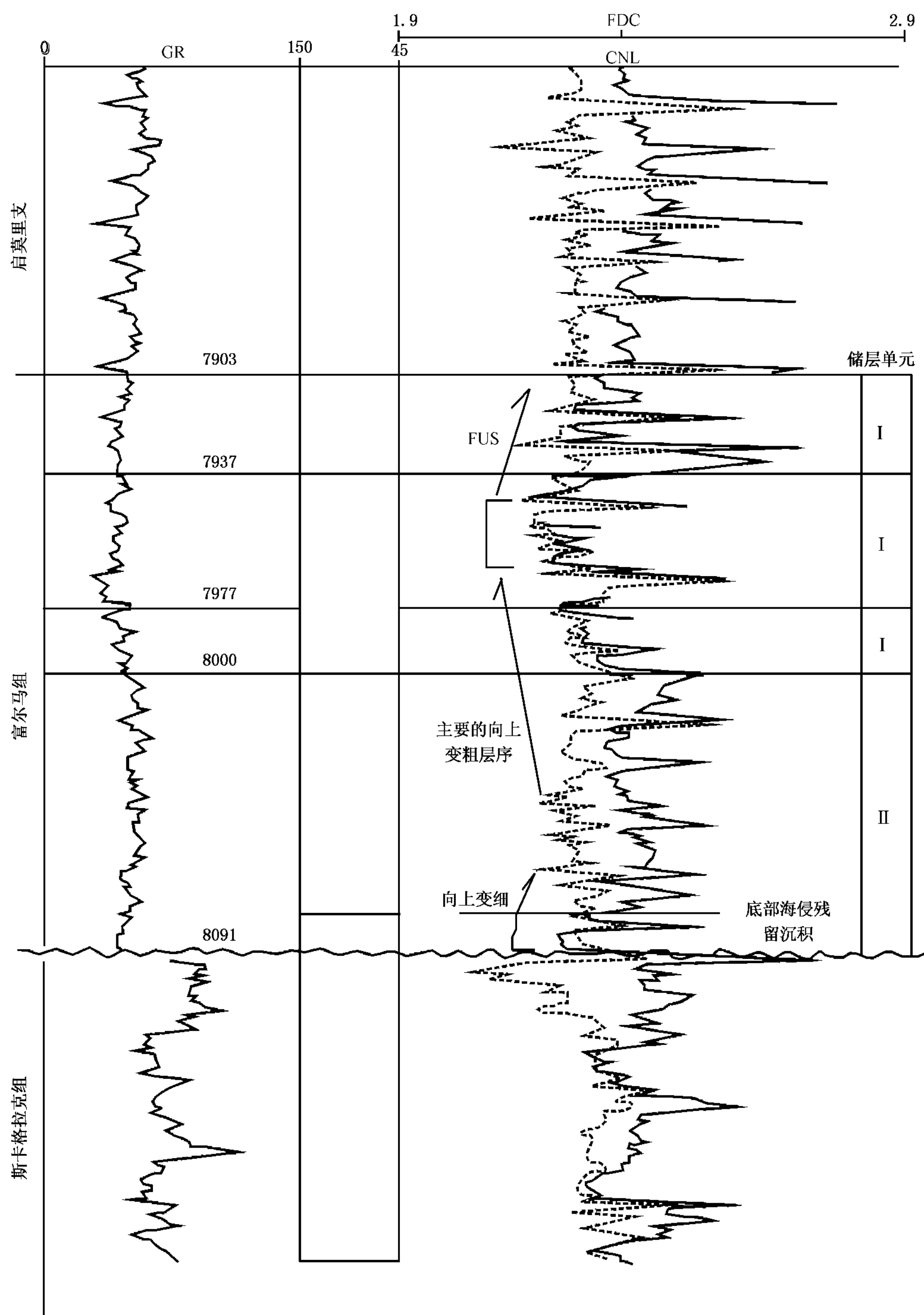


图 7—16　富尔马组典型剖面划分

与中扇背景内的沉积相一致。

北甘尼特油田于 1977 年被认识和圈出，于 1979 年经钻探证实在始新统泰砂岩和古新统福蒂斯砂岩中主要产天然气，只在储集层底含薄层油环。1984 年进一步证实了盐刺穿在该构造的存在。尽管在该构造西南部存在一些地层圈闭，但泰储集层由两个砂岩单元组成，即中部

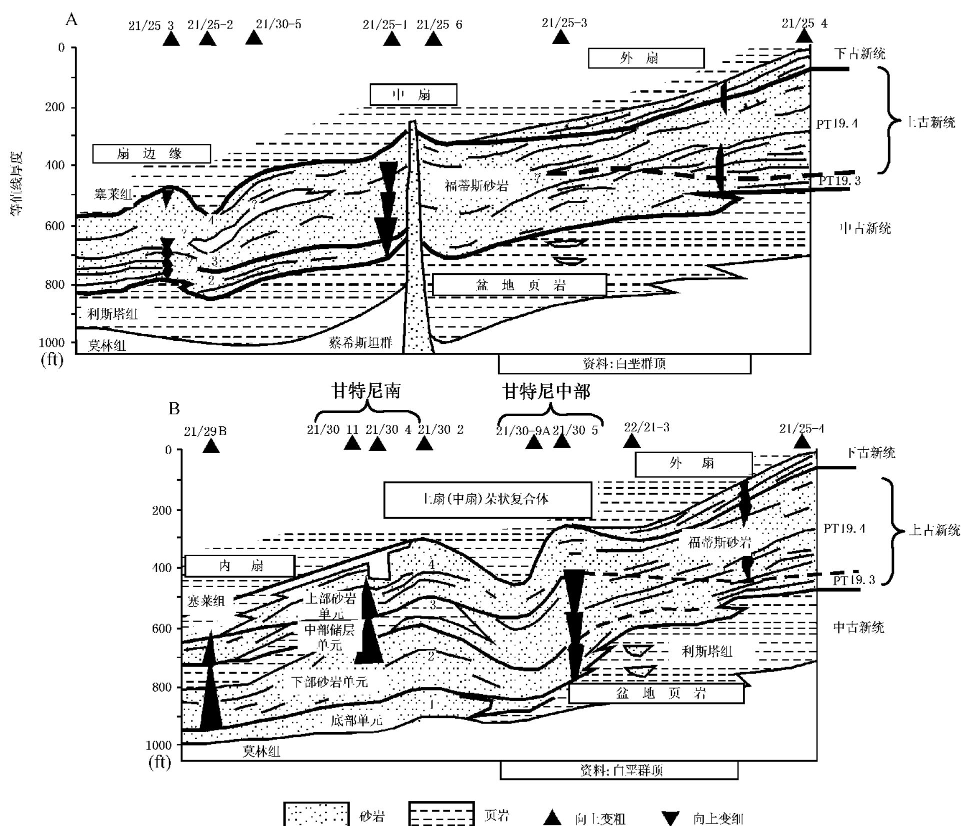


图 7—17 上古新统福蒂斯组岩石地层格架及沉积格架

和下部单元，中间被 18～21m 厚的页岩所分隔开。中部砂岩含天然气和石油，而下部砂岩已知含天然气。从福蒂斯砂岩向上到泰储集层都被区域广布的塞莱组页岩所封盖。福蒂斯构造完全为倾斜所封闭，产生 25.4m 高的油柱，大约在标出的溢出点之上 95.2m 处。

南甘尼特油田，发现于 1982 年，在古新统福蒂斯砂岩中发现了未成熟的重油（21°API）。福蒂斯储集层由两个砂体单元（上部和下部砂岩）组成，中间被 19.5m 厚的页岩所隔开。南甘尼特构造是一简单的穹隆，它被认为是后期（第三纪中期）在整个甘尼特地区都见到的盐构造再活动造成的（图 7—21）。

东甘尼特油田，发现于 1973 年，第一口发现井只发现 10.5m 的含油的始新统砂岩，后来在西北部证实在始新统泰上部砂岩内有一大约 30m 高的气柱，下伏有 15m 的石油“蛋糕盘”。在甘尼特油田群内，东甘尼特油田是最大的构造，它是一个简单的北西—南东向延伸的低起伏背斜，倾角在 1°和 4°之间（见图 7—20）。该构造长近 9km，宽 2～3km，被认为是围绕伸长的泰组富砂水道/扇复合体的差异压实造成的。沿西部边缘的圈闭，至少部分圈闭可能是地层圈闭，这是因为泰上部砂岩进入到盐形成的甘尼特北部和中部高点尖灭了。从东北到西南，纯砂厚/总厚比及孔隙度显著减小，被认为从中扇变到外扇朵叶造成的（图 7—22）。

西甘尼特油田，油气主要产在两个分开的储集层中，含薄的油环，天然气出现在早到中始新世泰组中，而未成熟的超压石油产在侏罗系富尔马组中。较深的富尔马聚集体出现在北北西—南南东向背斜构造中（图 7—20），该构造下伏有相同走向的蔡希斯坦统盐穹，该储集层段在盐穹的轴部是最厚的，侧向上则尖灭。断裂在构造的边缘发育，时代几乎完全为前白垩系形

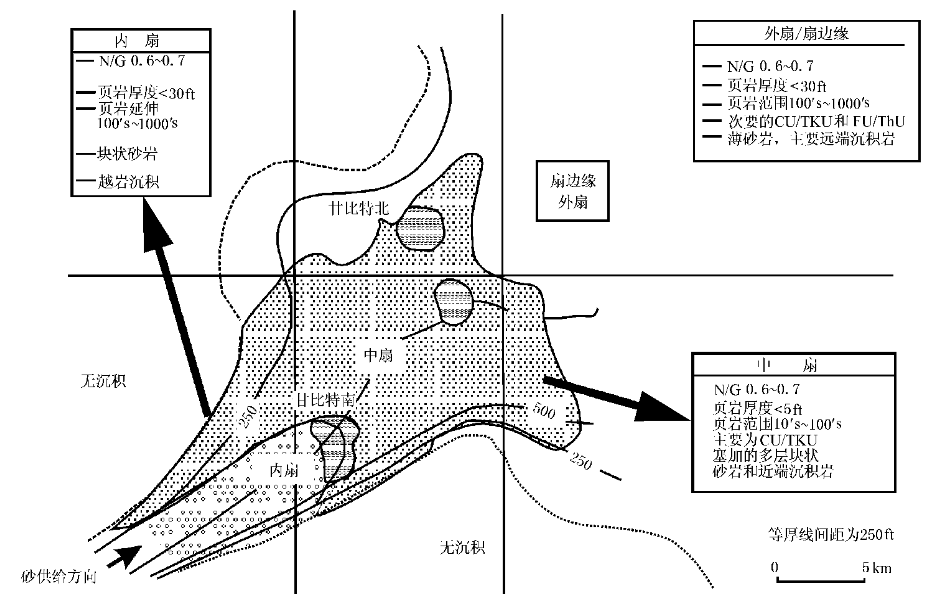


图 7—18 上古新统福蒂斯组储集层沉积模式简图

注：1ft＝0.3048m

N/G—纯砂岩厚度/总地层厚度；CU/CKU—向上变粗/变厚；FU/THU—向上变细/变薄

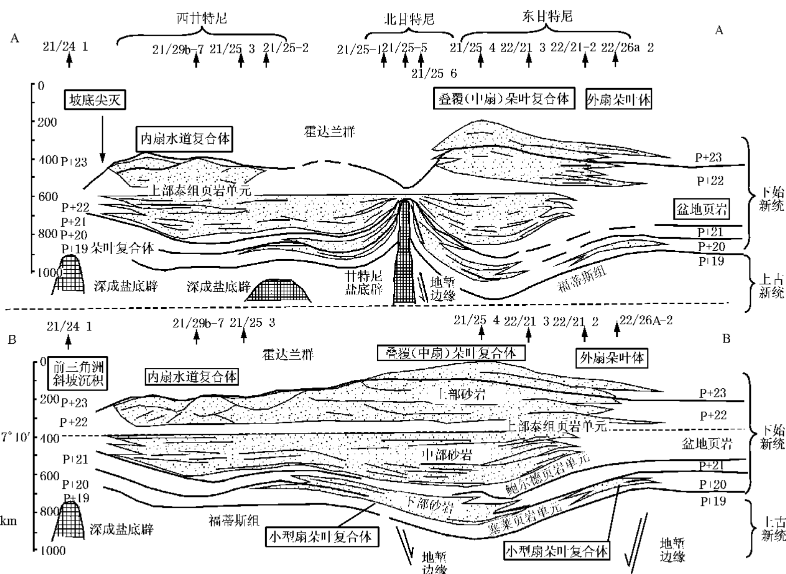


图 7—19 古新统泰组砂岩的岩石地层及沉积格架

成的。较浅的聚集是一向北东倾斜的低起伏构造，它的油气分布复杂，兼有构造/地层的性质。油气出现在上部和中部泰砂岩内，上部泰砂岩代表一大型的内扇复合体，油气出现在许多分支的水道充填砂体中，其间的沟通很有限。与之相反，中部砂岩是一相对较宽的扇叶沉积，天然气圈闭在一个简单的由盐穹形成的背斜中。

甘尼特油田群是由6个油田组成的油气聚集区，但从构造、地层、储集层发育和流体含量，油气分布等情况看，它们之间的差异是很大的，但是由于广泛的取心资料，使得对各储集层的

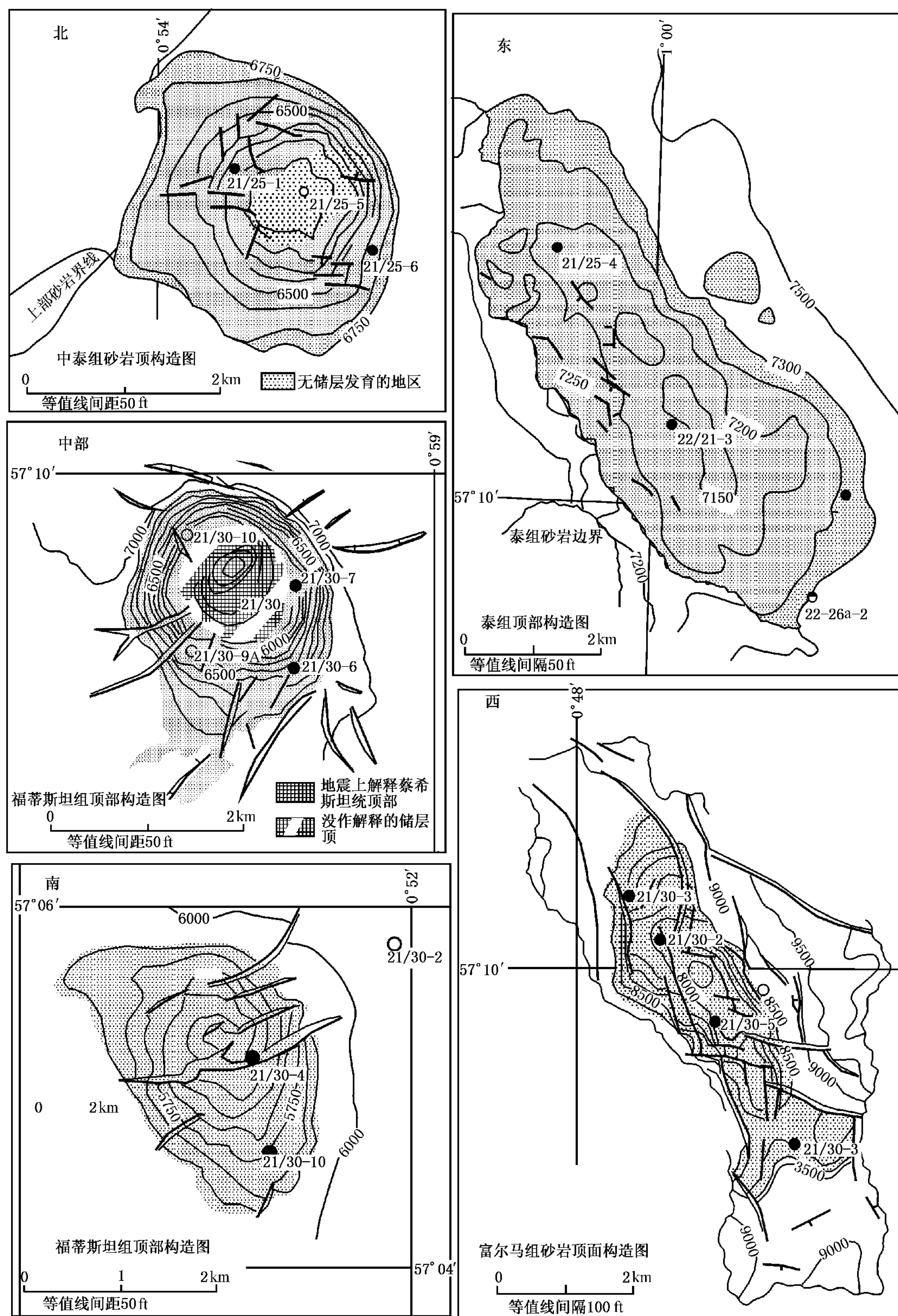


图 7—20　北、东、中、南、西甘尼特油田储集层顶构造图(粗——天然气、细——石油)

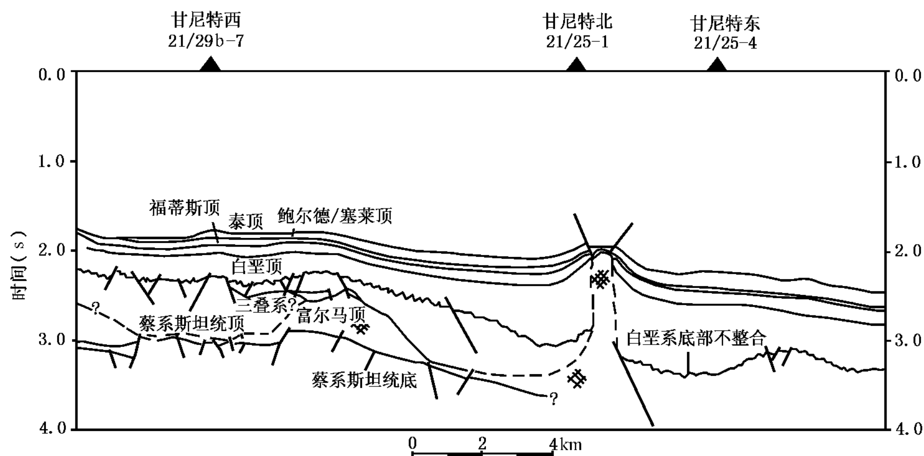


图 7—21　甘尼特油田的区域地震剖面

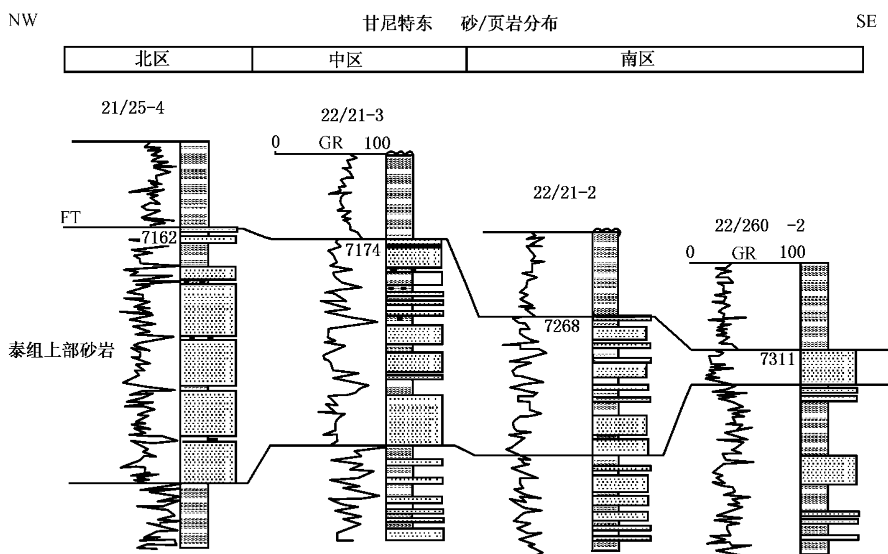


图 7—22　东、北、西、东南甘尼特油田中始新统泰组地层对比图

分布做出预测，并做出了各储集层的综合储集模式。结合区域的构造地层等方面的研究就可恰如其分地描述该地质背景内的 6 个油田。

六、克莱德(Clyde)油田

克莱德油田，位于 30/17b 区块内北北海中央地堑西南边缘，该区块位于奥科海岭断层系的东部。主要的构造形迹是一系列北西—南东向的雁列式断层阶地，从西部的奥科海岭下落到东部的中央地堑。产油储集岩发育在下落断层阶地上的上侏罗统富尔马砂岩中。克莱德油田中石油储量初步估算为 200×10^4 t，该区块内除了克莱德油田，还有两个较小的上侏罗统含油圈闭(阿尔法和伽码两个小油田)(图 7—23)。

克莱德油田的构造经区块内二维地震剖面资料和 2500km 长的二维地震资料的综合解释，并利用了许多的钻井资料。区内共有 7 口井，其中 3 口井深达二叠系赤底统砂岩，这样对区内的地层情况就可以有个粗略的了解(图 7—24)。

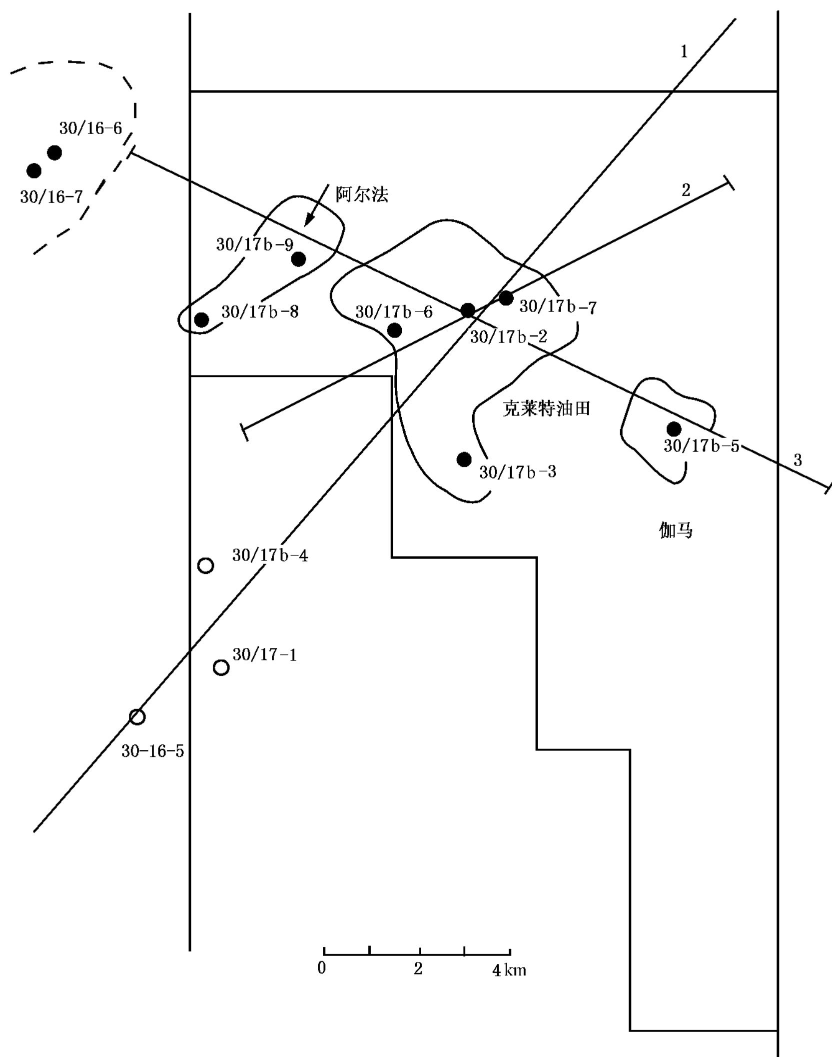


图 7—23　克莱德油田及卫星构造(阿尔法和伽码)

克莱德油田的主要储集层为富尔马砂岩层,一般厚达 180m 左右,其上部砂岩与下部砂岩之间夹 30～40m 的泥岩,上部砂岩一般厚 60～70m,下部砂岩厚达 90 多米,这两层砂岩的孔隙度、渗透率资料缺乏,但与甘尼特油田中该储集层的对比情况看,可能其孔隙度和渗透率条件还要好些。其埋深一般达 3700～3900m。该油田的另一储集层为二叠系的赤底统顶部砂岩,主要为含气,其盖层为蔡希斯坦统的硬石膏、粘土、灰岩及盐层。该储集层一般达 4800～5000m。

随着勘探开发程度的不断提高,对克莱德油田的认识也会不断加深。目前认为该油田的形成,与盐构造作用密切相关。综合地质、地震、钻井等方面获得的资料,必将对克莱德油田的形成、发展和油气远景有新的认识和了解。

七、阿盖尔(Argyll)油田

阿盖尔油田,位于中央地堑西部边缘英属 30/24 区块内,离苏格兰的阿伯丁 322km,它于

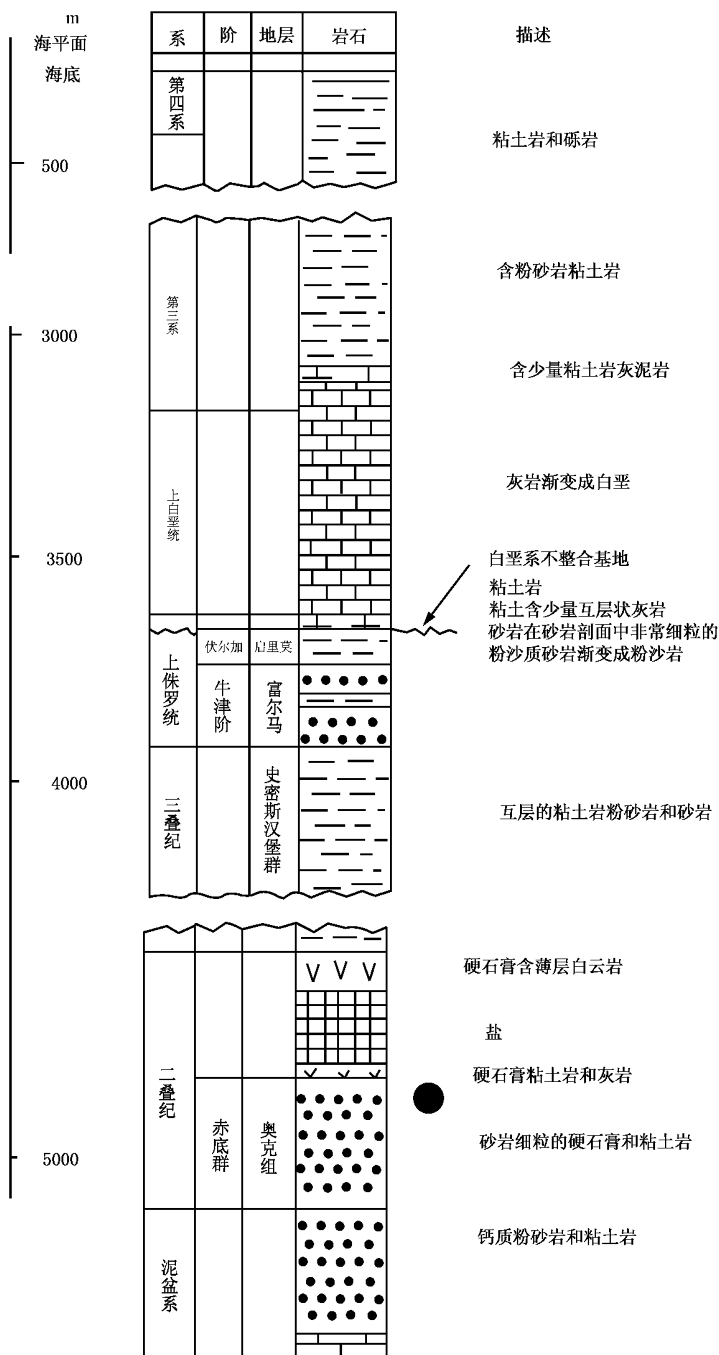


图 7—24　克莱德油田地层略表

1971 年被发现，1975 年 6 月投入生产，日产原油 35000～40000bbl（约 5000～5710t）。这是一个以二叠系赤底统砂岩为主要储集层的油田，构造上处于一个垂直于中央地堑的地垒上，以发育复杂的断层为特征（图 7—25）。阿盖尔油田成功的勘探归功于对岩心和测井曲线的完整研究，这些成为预测垂向相变、储集层性质的控制因素和有利钻探位置的基础。

该油田钻遇的最老地层为上泥盆统的砂岩，厚 244m，以薄互层的硬石膏粉砂岩，粉砂质细

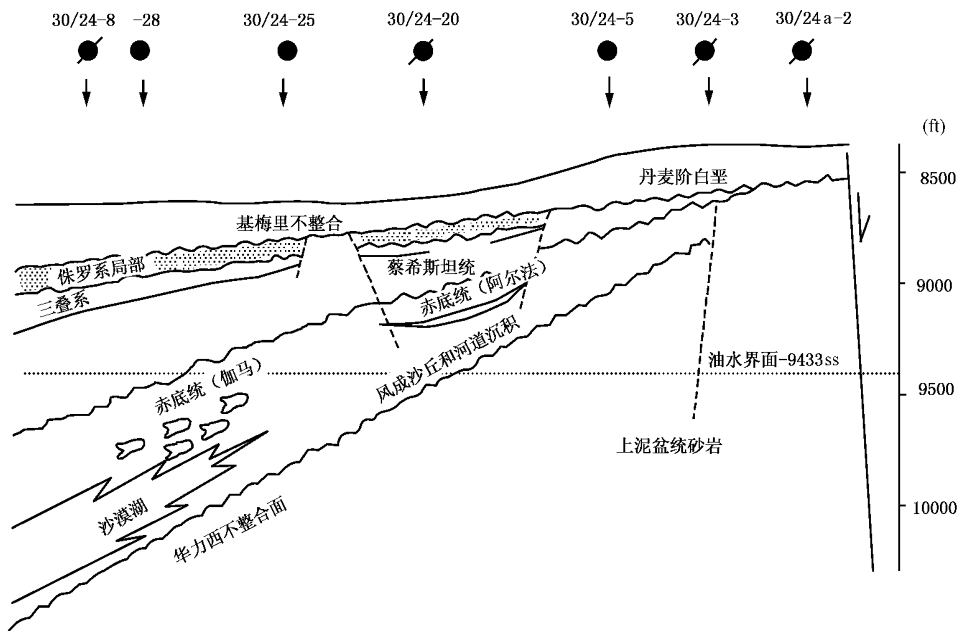


图 7—25 阿盖尔油田复杂构造与地层关系示意图

砂岩及页岩为主，其上二叠系赤底统砂岩以角度不整合形式与之接触，厚达 455m，往上为蔡希斯坦统的致密白云岩，厚达 10～31m。含大量因塌陷而形成的孔洞和裂隙。中生代地层因多次侵蚀，厚度很小，总共仅 87m，主要为一些海相泥岩和灰泥岩的沉积。新生代的地层则厚度巨大，总厚达 2682m，主要为海相泥岩，其中下部 40～76m，为致密的白垩质灰岩。

在阿盖尔油田，二叠系赤底统显示出垂向和侧向很大的不均一性，这主要是由同沉积构造和赤底期后的侵蚀造成的，同沉积构造经常导致地垒上的侵蚀或无沉积，而同时在侧翼的稳定地堑或旋转半地堑中发生沉积。许多岩心和测井曲线的研究结果表明，赤底统层序由 3 个主要沉积相组成：①风成沙丘/沙丘间相；②河道相；③时令沙漠湖/冲积平原相。它们组成了两个主要的储集单元：①“阿尔法”（Alpha）和“贝塔（Bata）”单元，主要由受风成影响的砂岩组成；②“伽玛（Gamma）”单元，主要由河道、冲积平原、沙漠湖及少量沙丘相组成（图 7—26）。

阿尔法单元由风成砂岩相组成，细到中粒，常见较粗的薄层，分选中到好，一般含大量圆状石英颗粒，具霜状表面结构，发育大型交错层理及低角度或平行的纹理。该单元代表长期的风成沉积，物源丰富，形成相对较厚（最厚 35m）的纯净加积砂岩，由于断层的切割使该单元地层在构造的北东和南西的厚度变小（图 2—27a）。贝塔单元地层，由互层状质纯而胶结差的砂岩和胶结好的泥质砂岩组成，质纯的砂岩与阿尔法单元中的沙丘砂岩相类似，但厚度小得多，泥质砂岩粒度较细，偶尔见具碎屑的云母富集的平行纹理。该单元主要分布于油田的中部，北西—南东小型的地堑中（图 7—27b）。阿尔法和贝塔单元的砂沉积物均显示出良好的储集条件，具有较高的孔隙度和渗透率，一般其孔隙度为 17%～28%，渗透率为 $300\sim3000\times10^{-3}\mu m^2$。形成这种良好的储集层，是由于少量石英次生加大的发育，以及缺乏自生粘土矿物的结果。经钻探证明阿尔法和贝塔储集层的石油初产率为 10000～12000BOPD。伽码单元由巨厚的河道相、冲积平原及沙漠湖相及部分风成相组成，油田的南部和西部含薄层风成砂岩，河道相以侵蚀面为界，向上旋□变细为特征，常伴有层间砾岩。冲积平原和沙漠湖相由互层状的泥岩、粉砂岩和细粒砂岩组成，泥岩中常见干裂和小规模的砂岩透镜体。该单元厚度变化较大

储集层	岩性	示意剖面	解释
阿尔法			白底板 风成沙丘
贝塔			潮湿的沙丘间相
伽马			辫状旱谷扇
			具低角度河流和末端朵叶体的冲积平原
			具河流三角洲隔离的边缘沙丘且伴有河流影响的沙漠湖
		未见底	湖边缘沙丘区

图 7—26　赤底统地层划分及综合解释示意图

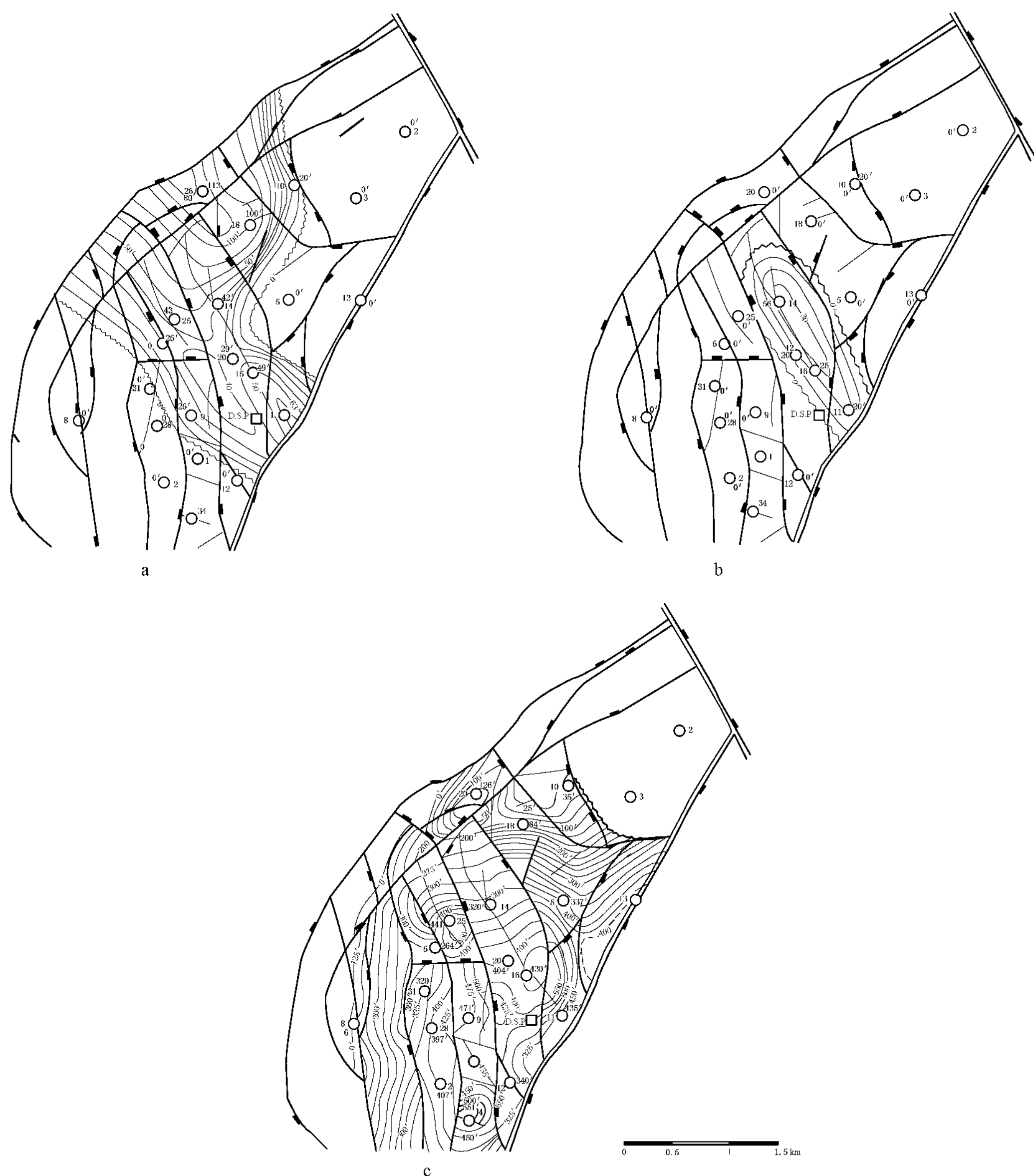


图 7－27　**赤底统不同储集单元等值线图**

a—**阿尔法单元**；b—**贝塔单元**；c—**伽马单元**

（**图** 7－27c），**可能是受同沉积断裂影响的结果，沙漠湖相继出现大量的白云石胶结物及伊利石粘土，使得沙漠湖相成为储集性能差的砂岩。而该单元中的河道砂岩和风成砂，却是具有较良好的孔隙度和渗透率的岩石类型，孔隙度为** 12％～28％，**渗透率达** $1000\times10^{-3}\mu m^2$。**然而，在河道砂岩中，当其含有较多的自生粘土矿物时，就使储集条件变差，这时孔隙就往往受到阻塞，大大降底了该储集岩的产能。一般说来，在油田中主要产层都由沙丘砂发育的层段来维持，沙丘砂岩在钻井中所占比例越高，则该钻井的产能也越高，相反，无沙丘砂岩的钻井，则该井的产能明显地降低，甚至很少产油。如果这些钻井中有较发育的自然裂隙系统和少量良好的河流砂岩的存在，还可以弥补一些因储层变化使产能下降所造成的后果。在油田南部的钻井发现了伽码砂岩的良好储集性，初产油达** 6000BOPD。

就封盖条件而言，直到丹麦阶沉积以后才形成有效的盖层，因而石油不可能来自蔡希斯坦统或较老的源岩层。大多数的证据表明古新统页岩在断层处与储集层连通。从钻井生产中测得蔡希斯坦统压力梯度为 0.59Pis/ft，在有效盖层形成之后，这种异常压力就附加在储集层上了。古新统和较年轻的页岩也是处于超压状态。因此这些页岩有可能是油田各种储集层的油源岩。

八、北海 B/22 区块重油油藏

B/22 区块中的重油矿区，位于北海英国海域内，在苏格兰的彼得黑德东北 64km，奥克群岛东南 88.5km（图 7—28）。水深 106m，储集层深度 914.4m。储集岩高度松散，含原油粘度在地层条件下为 0.132Pa·s。另外，油柱倾斜，下面直接与一个大的含水带接触。

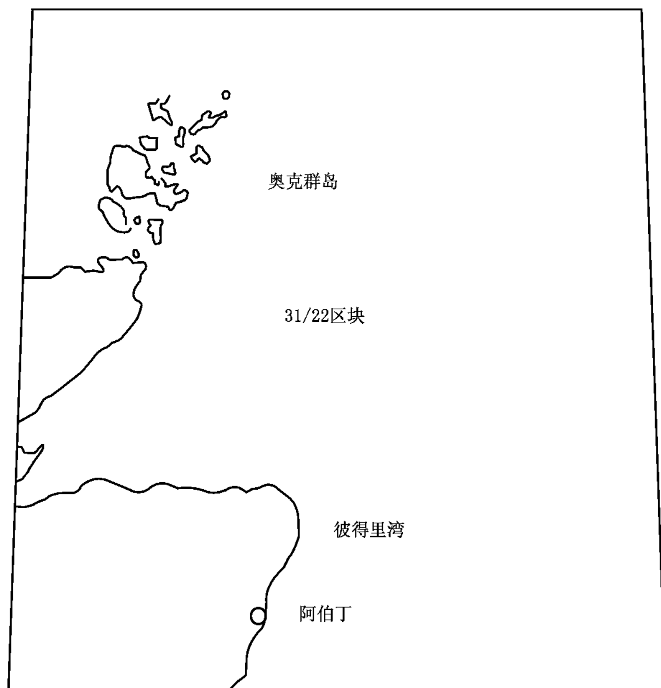


图 7—28　北海 31/22 区块重油油藏位置图

发现井为 1 号井，于 1977 年 4 月 29 日开钻，1977 年 5 月 18 日达钻井总深度 1456.3m。该井在 876.9m（海拔－850.6m）遇到一个胶结不好的松散的下白垩统产油层。图 7—29 为该区构造图，图 7—30 给出了储集层井段的剖面。

产烃层段的总厚度为 61.8m，净厚度为 58.2m，油柱中平均孔隙度为 31%，含水饱和度为 17%。根据测井分析和油的显示，油水界面在 938.7m 处，油柱倾斜，直接与约 30.48m 厚的水层接触。在 877.82～896m 井段上进行了测试。测试期间产生了大约为 $1.59m^3$ 密度为 17.6°API（$0.95g/cm^3$）的重油，储集层条件下粘度为 0.132Pa·s，其气油比为 $7.48m^3/m^3$。测试获得的资料表明，在 853.4m 深度处，油藏平均压力为 $93.65kg/cm^2$，渗透率约为 $3\mu m^2$。

该区块内的下白垩统目的层原油地质储量估计约有 $3.18\times10^8m^3$（相当于 3.02×10^8t），原油粘度高和埋藏浅，有利于开发，但关键是如何从粘性原油油藏中得到最佳采收率，由于掌握了提高原油采收率的技术，因而对该块的开发是完全可以办到的。

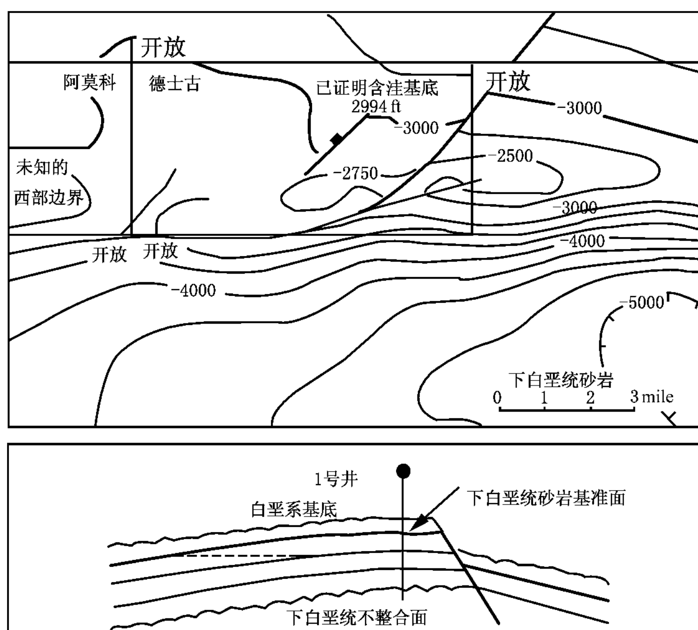


图 7—29 下白垩统砂岩顶面构造图及横剖面图

九、福蒂斯(Forties)油田

福蒂斯油田是1970年10月在北海英国海域中所发现的一个大油田，油田面积为 $90km^2$，可采石油储量 2.4×10^8t。油层属第三系古新统。油田的东北部水深91m，而西北部为131m。油田于1975年10月投产，日产435～631t密度为0.84的低硫原油。

根据5口井的岩心分析表明，平均孔隙度为25%～30%，最高渗透率为 $3.9\mu m^2$。在岩相B中渗透率范围为 $1\sim3.9\mu m^2$，而在岩相A及C中，砂岩层的渗透率变化极大，由 $0.1\sim1000\times10^{-3}\mu m^2$，但大多数的渗透率介于 $100\sim200\times10^{-3}\mu m^2$ 之间。

位于油藏构造顶部的井，钻穿了整个油层厚度。日产可超过2000t，平均日产量也达到1067t。勘探证实，该油藏为一无原始气顶的非饱和油藏，原始地质储量约 6.132×10^8t。采收率按40%计算，可采石储量约为 $2.86\times10^8m^3$。

福蒂斯油田位于北北海第三系盆地的西侧，沉积槽轴线位于英国和挪威大陆架中线附近，大致为南北走向。在沉积槽轴线第三系和第四系的沉积最大厚度达3500m。第三系沉积几乎完全为陆源沉积，主要为泥岩，古新世和上新世—更新世沉积岩性主要为砂岩，为油田的储集层。

该油田为一东西走向而比较平缓的背斜构造，东西长16km，南北宽为8km，圈闭面积为 $90km^2$，垂直闭合高度为155m。整个油田未受到断层的影响。油田构造图如图7—31。

福蒂斯油田的产层由两套层系组成，上部称为查利砂岩(Charlie Sand)，其厚度为0～75m，主要由两部分组成，呈透镜体状。下部层系称为梅因砂岩(Main Sand)，分布于整个油田上，厚度60～140m，为砂岩、页岩交互层，可分为 L_1、L_2 及 L_3 3个小层，其东西向剖面图如图7—32所示。

福蒂斯油田古新世晚丹麦期层段可以划分为4个不同的岩性单元，自下而上简述如下。

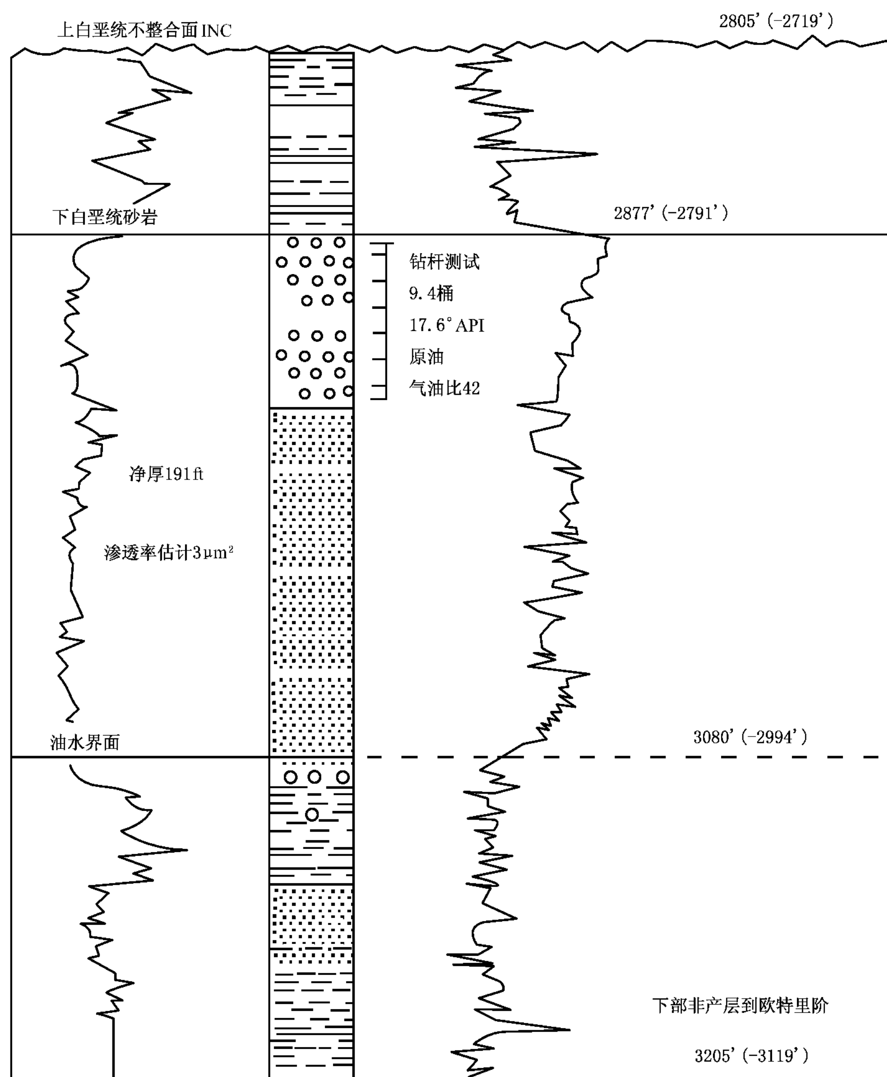


图 7—30 德士古 1 井储集层段测井剖面

1. 单元 Ⅰ(—2248～—2490m)

此单元又可分为两个层段:下部层段以砂岩、钙质砂岩、石灰岩和泥岩组成。上部层段为砂岩、粉砂岩和页岩交互层。砂岩普遍为疏松的灰色细粒粉砂岩,在整个层段中存在薄的石灰岩及钙质胶结的硬砂岩条带。

2. 单元 Ⅱ(—2098～—2248m)

此层段完全为古新世厚砂岩,是油田的生产层。主要为砂岩和泥岩组成,不同的岩性划分成 A、B、C、D4 个岩相。

岩性 A 的特征是细粒砂岩,局部为粉砂岩,通常含有云母和褐煤碎屑。在砂岩层中夹有厚度小于 1.5m 的粉砂岩和页岩夹层。砂岩层的孔隙度和渗透率等岩石物性由中等到很好,是油田中的较好产层。

岩相 B 为均质的纯砂岩,颜色由棕色到白色,颗粒由细到粗,分选性由差到中等。岩石物性极好。在厚的砂岩层段中夹有页岩薄层及由碳酸盐岩胶结的非渗透层段,以及极少的砾石

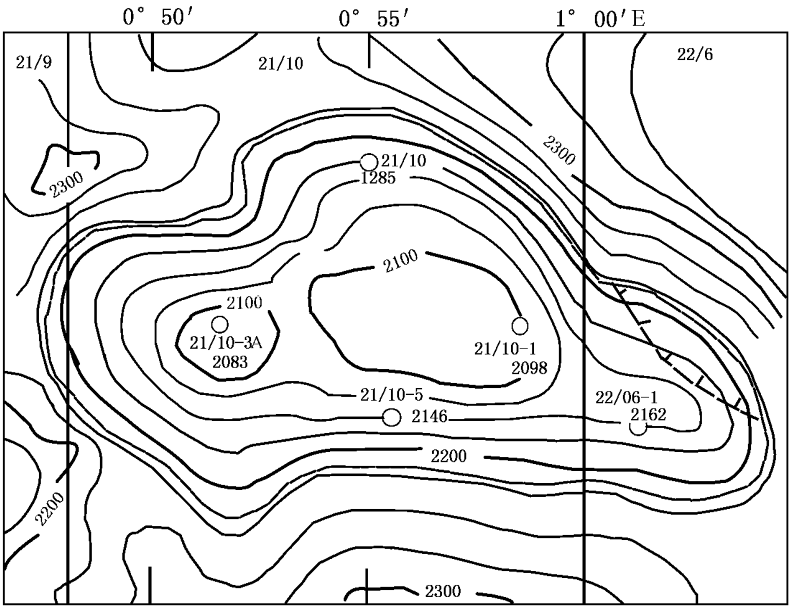


图 7—31 古新世油藏顶部构造图

(等高线以海平面以下来表示,间距 25m)

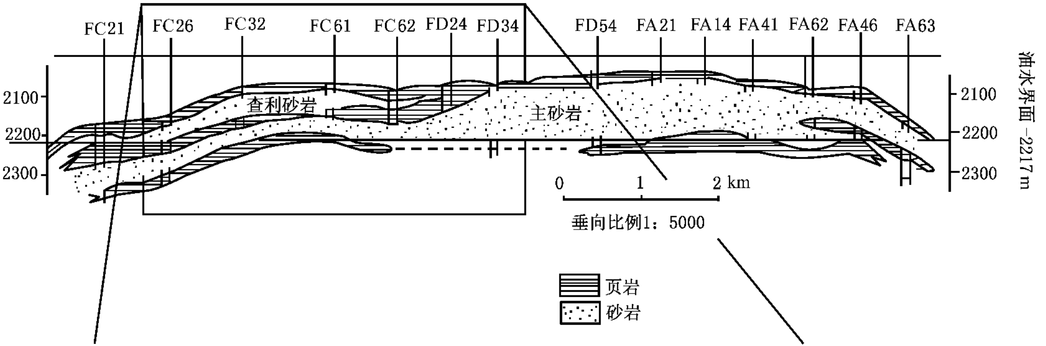


图 7—32 福蒂斯油藏东西方向剖面图

层。砂岩的厚度可从 35m **到** 80m **之间变化。是油田中部的主要产油层。**

岩相 C **主要为灰色高岭土页岩和颗粒比较均匀的粉砂岩和页岩交互层,在这些层段的底部有经过明显侵蚀的深红色细粒砂岩。**

岩相 D **只出现在油田东部,以含有大量海洋生物的绿色多孔蜡状页岩,和伴随有深红色页岩、黑色石灰岩、白云质泥岩和菱铁矿结核组成(图** 7—33)。

3. **单元**Ⅲ(—2066～—2098m)

此层岩性较单一,主要为薄层石灰岩及少许钙质页岩和泥岩。它构成了单元Ⅱ**的上覆的盖层。**

4. **单元**Ⅳ(—2018～—2066m)

为灰绿色泥岩和红色泥岩所组成,其中夹有薄层石灰岩。也是储油层的直接盖层。

该油田 1978 **年达到产油高峰,日产** 79494m^3(**相当于** 66775t **原油),一直延续达** 4 **年之久,之后产量降低。**

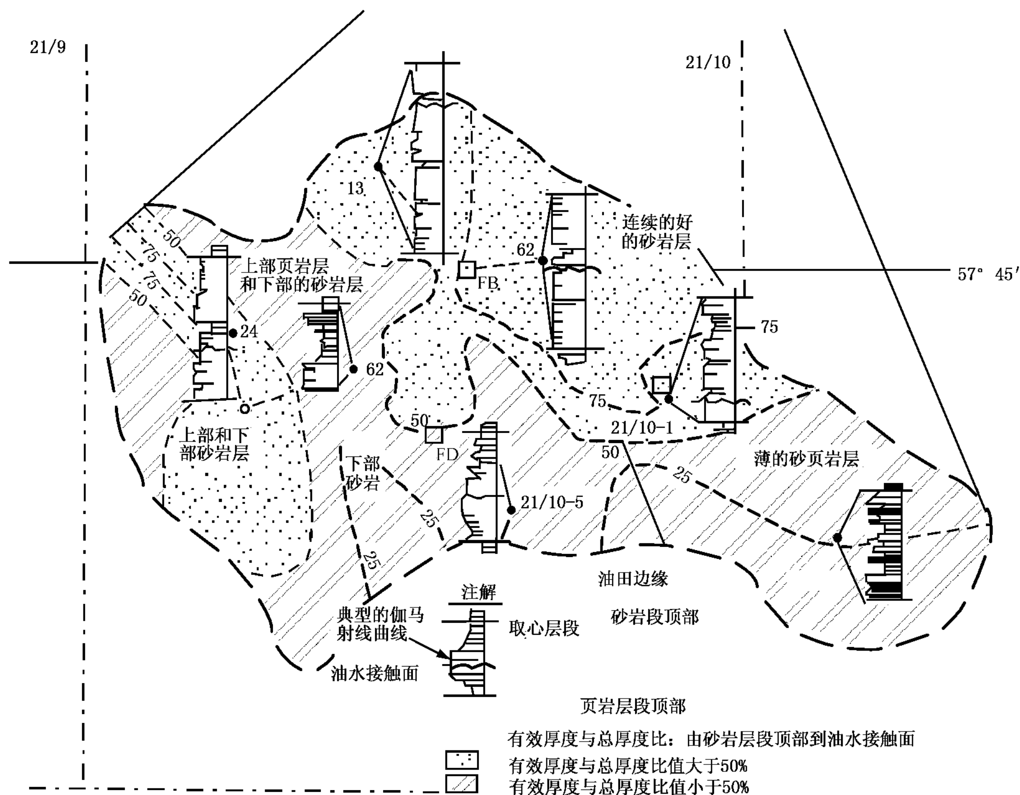


图 7—33　油田开发后所解释的岩相分布

第二节　挪威海域中的油气田

在北海油气田未发现前，挪威属非产油国，自 1965 年以后，挪威海域开放，开展了一些区块的勘探，于 1969 年 2 月发现了埃科菲斯克油气田群，才使挪威摘掉了非产油国的帽子。自此以后，陆续有所发现，到 1990 年已发现油田、气田及油气田共 14 个，探明原油原始可采储量达 19.17×10^8t（累积产量为 4.09×10^8t，剩余储量为 15.08×10^8t）。近几年来，挪威又有新的发现，目前已知有油气田数近 50 个，挪威已成为北海产油气最多的国家，其剩余可采储量也占北海盆地的首位。

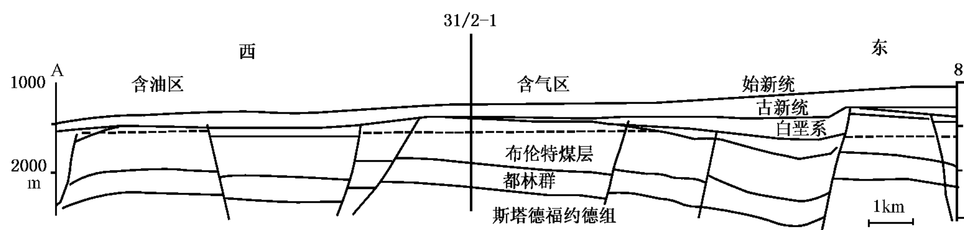
一、特洛尔(Troll)油田

特洛尔油田位于挪威海槽，在卑尔根西—北—西方向 80km 的海域，油田伸展至 4 个区块，即 31/2、31/3、31/5、31/6，该区水深 320～350m，勘探证实它为巨型油气田，分布面积约为 $700km^2$。该油田发现于 1979 年，首先突破了 31/2 区块的产油气关。经勘探和测试表明中—上侏罗砂岩聚集了大量油气。

31/2 区主要油气聚集区天然气地质储量为 $5510\times10^8m^3$，原油地质储量 $3.4\times10^8m^3$，油层最大探明天然气原始可采储量为 $33435.6\times10^8m^3$（累积产量为 $2117.6\times10^8m^3$，剩余储量为 $31318\times10^8m^3$），厚度 14m。组成 31/2 区块的第二聚集区，即在油田西部低部位的卫星构造查明，油层最大厚度为 28m，原油地质储量 $1.55\times10^8m^3$，天然气地质储量 $230\times10^8m^3$，31/

2 区块天然气体积估计大约为油田总体积的三分之一。31/2 区块油的总体积比例要大一些，在 31/2 区块的油气聚集区内，主要特征是面积大，储集层浅（1500m）和相当好的砂岩，渗透率以达西计。

31/2 区块内有多个南北方向的倾斜断块构造，这些构造延伸至 31/3，31/5，31/6 区块。特洛尔构造西部，主要是在 31/2 区块内发现西北—东南方向断层组成的几个相似的封闭断块（图 7—34）。储集层为中—上侏罗统，形成厚 400m 的砂岩层系，被称为亨伯组，储集层为粗粒纯净砂岩，横向连续性好，渗透率一般来说以达西计。其下伏为细粒云母砂岩层段，并具有楔形纯净砂岩夹层层序，其渗透率则在 $10\times10^{-3}\mu m^2$ 至几百个毫达西之间变化。90％的油气发现于亨伯组的纯净砂岩中，其底部的细粒云母砂岩中发现量有限。纯净的高渗透砂岩储集层中存在着钙质胶结的致密薄层，横向上不稳定，延伸较小，所以对油藏生产动态的影响很小。由于该油田目前在 31/2 区块内的勘探开发较集中，因而报导的资料也多限于 31/2 区块。



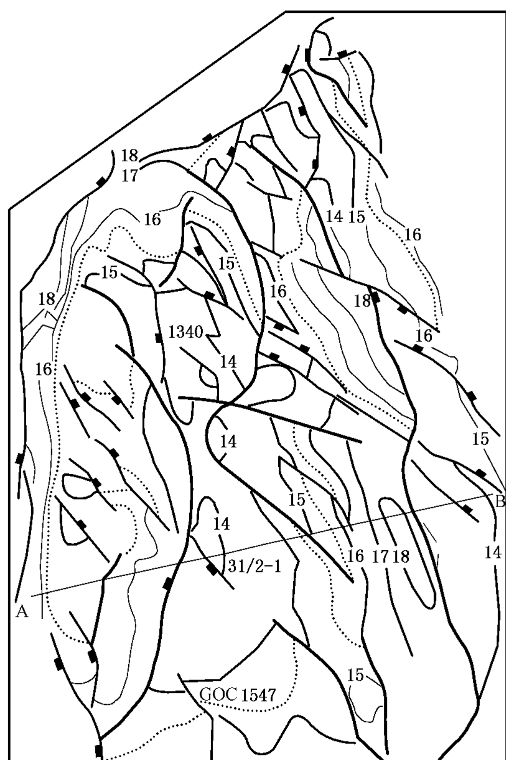


图 7—34　特洛尔油气田储层顶部深度图及横剖面示意图

（等深线单位：100m）

在 31/2 区块，根据油层厚度，分成两个不同的区。西部区块，油层厚度 22～28m，被称为油区（图 7—34），东部薄油层，厚度为 12m，被称为气区。油柱厚度由西部厚油柱向断层东翼上升盘的薄油柱致密云母砂岩过渡，两者呈并列关系。

根据 31/2 区块已取得的勘探和测试成果，分气区和油区分述如下。

气区自 1980 年对 31/2—2 井进行生产测试以来，已发现在不同的断块其储集条件也有较大的变化。例如 31/2—2 井（图 7—34），位于气区构造东部的低部位，油柱为 12m 厚，油气界面 1547m，油层底部砂岩物性非常好，空气渗透率高达 $8\mu m^2$，最高产液量达 $400m^3/d$，含水 25%，原油密度 25°API(0.9033)。对该井进行模拟研究所并作的预测表明该井日产油量为 $130m^3/d$，含水 15%，在不大量采气的情况下，含水可以稳定很长的时间。31/2—3 井位于北部断块，测试层段厚度 12m，为致密的云母砂岩，原油密度 24°API(0.9038)。31/2—6 井位于 31/2 北部并延伸至 31/3 断块的内部。上部为未固结的高渗透性砂岩（渗透率 $6\sim12\mu m^2$），下

部有两个致密层，其渗透率就仅有几个至十几个毫达西了。

自 1980 年以来也取得了已发现的几口油井的储集油气的情况。31/2—5 井存在厚油层，在气层以下钻遇 22m 未固结高渗透性均质砂岩油层（渗透率高达 $10\mu m^2$），这口井在油气界面以下为含油饱和度 25％的油层。原油密度为 0.88（29°API），虽然同属一个储集层，但由于断块的分割，与 31/2—2 和 31/2—3 井中原油密度不同。

31/2—7 井钻穿 28m 油柱，为可变性的砂岩层系，渗透率为 $1\sim10\mu m^2$，被几个灰质致密层隔开。原油产量为 $1110m^3/d$，含水稳定在 3％。

31/2—11 井钻穿 28m 油柱（与 31/2—7 井相同），以云母砂岩为主，有相当好的油层砂岩。好油层渗透率高达 $8\mu m^2$。最高日产原油 $1240m^3$。

31/2—13 井 1984 年钻于 31/2—5 井北部。该井好砂岩向下仅占油柱的一半，在油水界面附近也存在有灰质致密层。致密层的横向变化范围尚未查明。测试原油产量大约 $477m^3/d$，并同时有气产出。

在整个 31/2 区块内，已经观察到原油密度及由此产生的油质的变化，特别是在油层条件下原油粘度对生产能力是重要的。在油区南部的 31/2—5 井，最轻的原油（29°API），粘度 $1.3\times10^{-3}Pa\cdot s$，向北逐渐变重、变稠。

二、奥丁（Odin）气田

奥丁气田位于北海挪威海域 30/10 区块。它与弗里格大气藏、东北弗里格气藏和东弗里格气藏处于同一水动力体系内（图 7—35）。奥丁气田是北海挪威海域内的小气田，发现于 1974 年初，它是弗里格大气田的卫星气田，由于它的储集层同弗里格储集层一定程度上存在连通关系，在弗里格大气田开发后，使其受到一定影响。

组成奥丁气田的砂岩储集层是形成弗里格气田储集层的始新统海底扇砂岩层的延伸。地震资料表明，奥丁气田和弗里格气田中的弗里格储集层砂岩通过一个狭窄的通道连在一起（图 7—36）。形成烃类圈闭主要与原始的海底扇沉积地貌有关，砂岩与泥岩的差异压实进一步使圈闭成形。烃类充满了构造，近于溢出的程度，该气田构造近似椭圆状（图 7—36），圈闭面积约 30 多 km^2。

奥丁气田储集层同弗里格气田储集层一样为均质砂岩，储集条件极好。其基本储集层物性数据见表 7—4。从表中可见，测定的烃类原始地质储量体积为 $463\times10^8m^3$，其中含有少量原油，但这些原油粘度高，油层又很薄，开采价值不大。奥丁气田储集层性能好，单井产量很高，日产气高达 $20000m^3$，不出砂，也不产生储集层压降。钻于气田顶点的井，钻遇 53m 厚的气

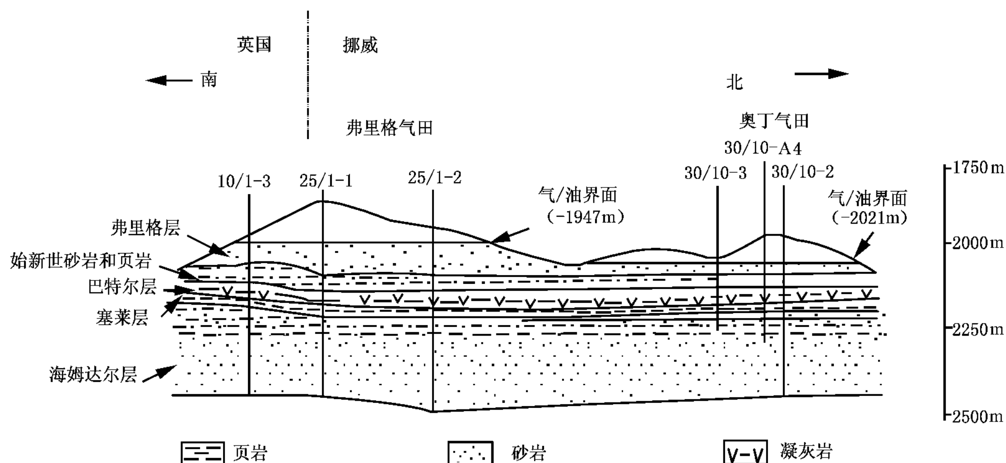


图 7—35　奥丁气田与弗里格气田储集层横剖面图

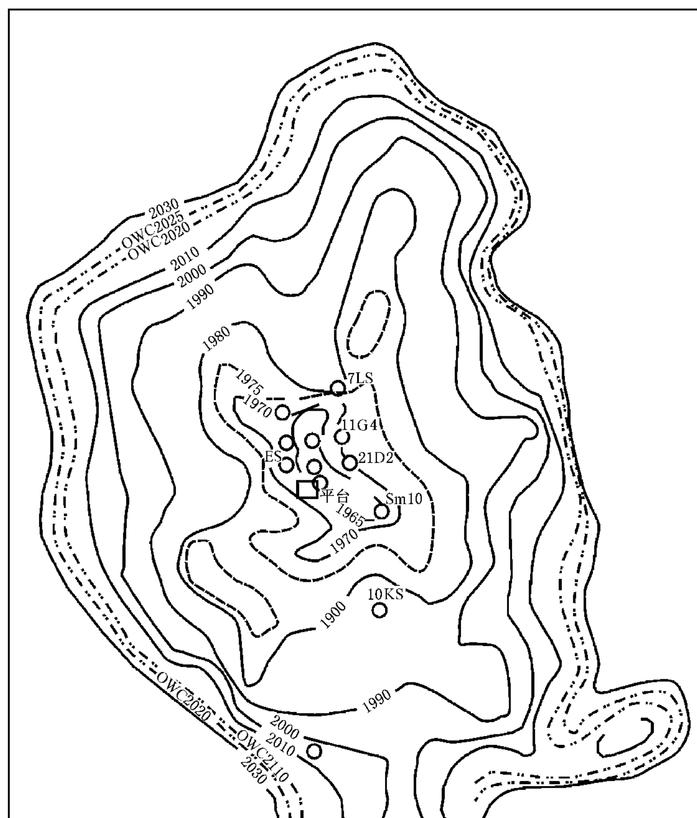


图 7—36　奥丁气田弗里格砂岩顶部构造图(等值线单位:m)

层,流量为 44000m^3/d。钻于气田南翼的井,确定了两个气层和气下面的一个薄油层。

奥丁气田由单个固定平台开发(图 7—36)。该平台位于奥丁构造主体部分的顶点南边。已钻了 11 口井,有 10 口钻在储集层内或 —1970m 等高线附近及平台位置下面的构造顶部。有 9 口井的井底间距约 250m。由于储集层质量高,这种开发方法既满足了供气能力的要求又不会产生井间干扰,从而降低了钻井费用。

表 7－4　奥丁气田储集层基本数据

储集层物性	公制单位
水深	103m
烃/水界面	－2025m
原始储集层压力	206.6×10^5Pa
储集层压力(1984 年 6 月)	196.2×10^5Pa
压力数据深度	－2026m
孔隙度	29.5％
渗透率	$>1000\times10^{-3}\mu m^2$
原始水饱和度	19.0％(在产气层)
岩层总体积	$1026\times10^6m^3$
净储层/总地层厚度之比	0.93
气油比	$80m^3/m^3$
原油密度	26.6°API
原始地层气(不包括溶解气)	$4.63\times10^8m^3$
可采气储量	$345\times10^8m^3$

从奥丁气田开发初期到目前生产获得的静态和动态全部资料表明，气田基本上是靠压力衰竭生产。储集层压力是奥丁气田最重要的动态指标。奥丁气田虽然存在底水层，但水驱是非常有限的。由于该气田储集层流动特征极好，能使压力达到均衡统一，从而在气田开采过程中得到最佳采收率。

三、海姆达尔(Heimdal)凝析气田

海姆达尔气藏是 1972 年在挪威区域的 25/4 区块内钻第一口井时发现的，该井位于弗里格油田南大约 35km 的地方，后来又钻了几口评价井和做了几次地震以后，确定可采储量为 $350\times10^8m^3$ 的气和 $3.1\times10^6m^3$ 的凝析油，该凝析气田于 1985 年正式投产。

从 1981 年到 1985 年设计建立了海姆达尔平台，其主要设计特点如下：

(1)9 口生产井及 1 口观察井兼凝析油回注井；

(2)天然气年产量(MDD)$10.8\times10^9m^3$；

(3)凝析油产量 $1500m^3/d$；

(4)一个综合的多功能的钢结构平台，具有钻井、生产及生活设施；

(5)一条直径 8in(0.2m)长 177km 的凝析油管线直达布雷，在那里海姆达尔凝析油同布雷原油混合并通过福蒂斯集输系统输送上岸；

(6)一条直径 36in(0.9m)的天然气输送导管接到 Statpipe 系统上。

海姆达尔凝析气藏生气层被认为是下伏侏罗系页岩，盖层是上覆的始新统罗格兰群的泥岩，储集层以中—细粒未胶结的砂岩为主，属于古新统海相沉积。

石油圈闭的储集层为上覆厚层的泥页岩层系所密封。储气层的下面有一个大约 3m 厚的薄油层。气藏的排泄和压力受一巨大的下伏的渗透含水层控制。现将有关储集层方面的资料列于下面。

(1)构造顶埋深：平均海平面以下 2028m；

(2)最大气柱高度：135m；

(3)储层原始压力：217.6×10^5Pa(在平均海平面以下 2123m)；

(4)预测枯竭压力：174.6×10^5Pa；

(5)原始储层温度：76.2℃；

(6)原始气储量：$500\times10^8m^3$；

(7)可采烃类：$35.6\times10^9m^3$；

(8)可采凝析油：3095×10^3t；

(9)可采干气：$33.9\times10^9m^3$。

四、挪威 2/2 区块的气田

在 2/2 区块内的两个分离构造中发现了天然气。天然气存在于晚渐新世砂岩中，砂岩可能是一次较大的海平面相对下降时，由于风暴潮造成的沉积。该区块位于北海盆地中部中央地堑东北翼上(图 7－37)。已钻的产气井有 2/2－1 井和 2/2－2 井(见图 7－38)，于 2/2－1 井渐新统砂岩中，还有一个含油的启莫里阶砂岩，并在该层序中有天然气发现。在 2/2－2 下渐新统中也发现了天然气。经测试日流量为 $0.28\times10^6m^3$ 天然气。

在第三纪，北海是一个主要的沉积中心。该时期，随着盆地区域坳陷而形成了一个厚的碎屑层序，但所形成的沉积层序以泥质为主。在该区采集到的浮游有孔虫类化石鉴定说明其地质年代属于晚渐新世的早期。该层序中所夹砂岩一般是由分选良好的海绿石粗粉砂和极细砂以及少量泥质粉砂岩间互层组成。该砂层含的特有成分是少量生物成因混合碎屑粘土。根据已取得的钻井资料看，该层序在区块内厚度变化不大，岩性也大致相同。只是在有的井中为较粗、分选较好的岩性类型为优势，而有的井中其岩性以细砂为主、分选程度不一而已。

渐新世砂层，与其上覆页岩层序相比较，其地震反映的特点是高声速和高密度，因而，在这些单元的界面显示出声阻抗增大，产生了强的正的地震反射。在地震测线上能连续追踪到这个高振幅同相轴可作为砂岩存在的依据，而且某些井勘探结果也说明了这点。随着泥质含量的增加，振幅向东北方向减少。在西南方向，反射显示出一个变化的振幅，可能与一个砂层变薄或缺失相符合(图 7－39)。

渐新世砂层单元之上和其下部是深水页岩，这表明砂层沉积是伴随着一次海平面的暂时下降。这可能是由于全球海平面变化或局部构造上升所引起的。但是这次海平面下降的本身还不能为砂层的分布提供充足的解释。通过对渐新统构造趋势的分析(图 7－40)，说明 3 种构造因素对砂层的分布可能有较大的影响。它们与区块中部的旋转轴有关；与对应于主要的侏罗纪断层的隆起轴有关；而且与形成 2/2 区块的阿尔法(Alpha)和贝塔(Beta)构造的盐体运动有关。

取自两口井的气具有非常相似的组分特征，甲烷含量高(98.2%)而 C_2 浓度低，C_1/C_2 的高比值可能不是生物成因气就是运移的热成因气的特征。已知对天然气成因的确定，甲烷中的碳同位素的变化是重要的特征。生物成因气 $\delta^{13}C$ 值从－60‰到－75‰，取自 2/2－1 井天然气的 $\delta^{13}C$ 值为－64.8‰。这一数值以甲烷含量高就有力地说明了 2/2－1 井中天然气是以生物成因为主。取自 2/2－2 井天然气中测得的 $\delta^{13}C$ 值为－38.3‰，这似乎说明它是运移的热成因气。

2/2 区块内的阿尔法和贝塔两个远景圈闭都是早中新世的正向构造单元(图 7－41)，并且都能形成有潜力的生物成因天然气圈闭。

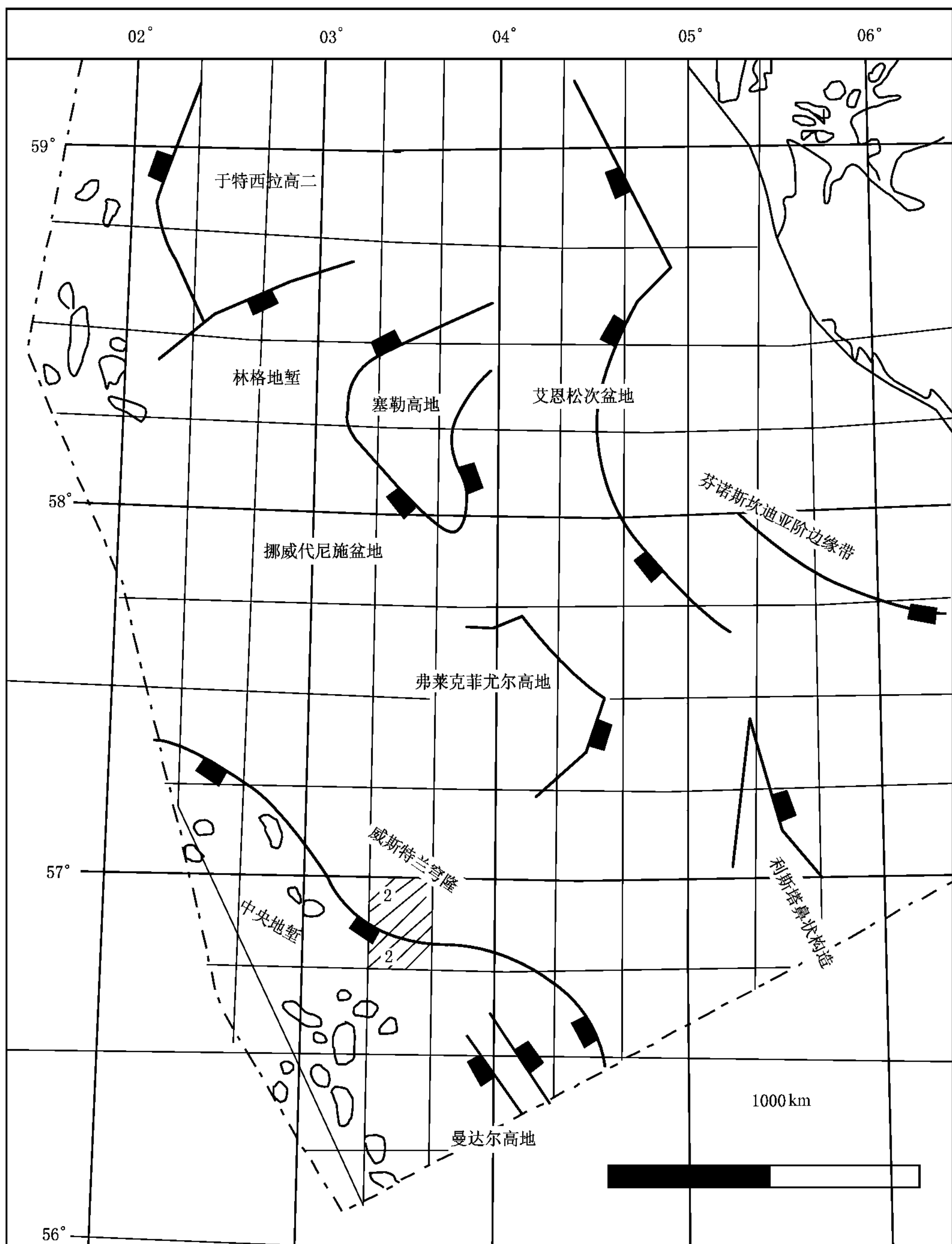


图 7—37　2/2 区块的位置及主要构造特征

Rice 和 Claypool(1981)已提出确定生物成因天然气生成的一套判断标准。其要求包括缺氧和硫酸盐缺失环境。0～75℃之间的温度与最小的代谢有机物相当,大约 0.5%有机碳和埋深小于 2000m。北海第三系层序一般都具备这些条件。一般认为第三系砂层中的任何一种砂层发育的地区及从天然气开始生成就具有充足的排泄区的构造,都可能是生物成因天然气的远景区。有人曾作过估算,生物成因天然气占世界天然气储量的 20%还多。因此,在未来的勘探目标中,北海也不应例外,应把生物成因的天然气远景圈闭包括进去似乎是有充足的理由

的。

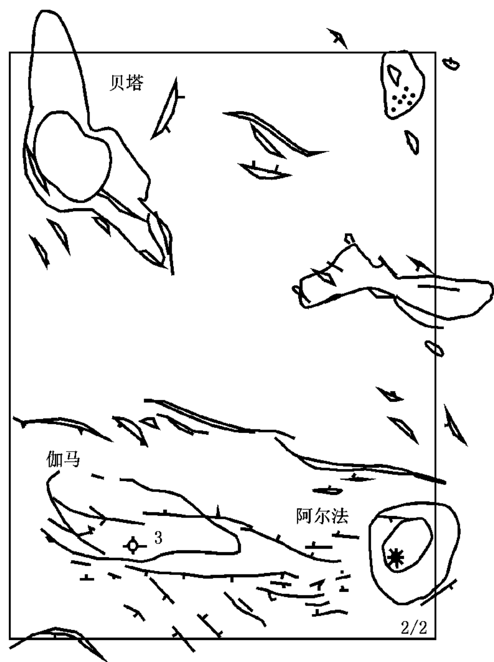


图 7—38　2/2 区块产油气井位及侏罗系断层型式

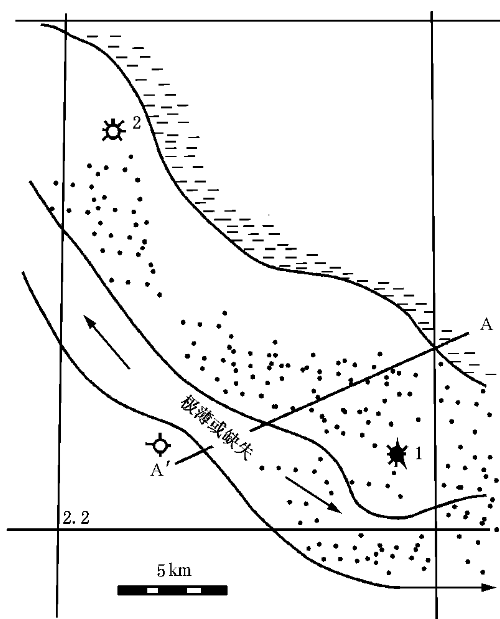


图 7—39　渐新世砂层单元的分布

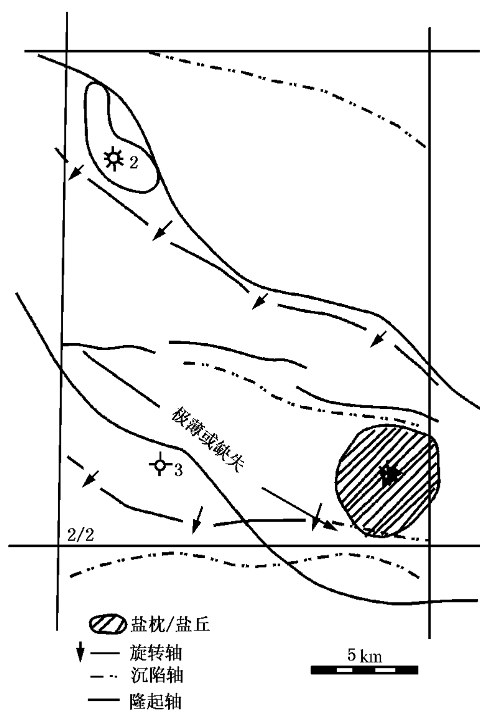


图 7—40　相对于构造趋势的渐新世砂岩的分布

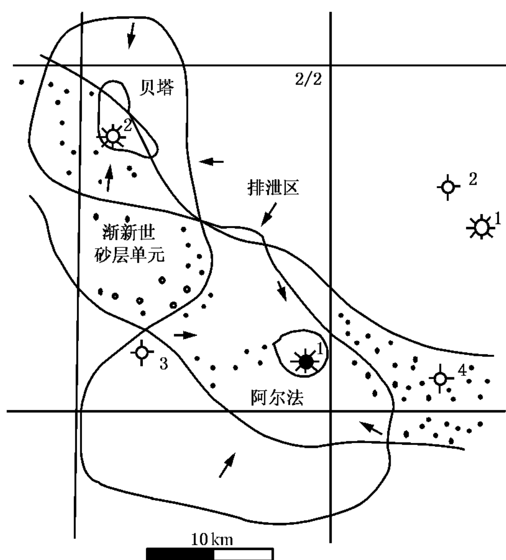


图 7—41　早中新世阿尔法和贝塔构造的排泄

五、埃达(Edda)油田

埃达油田位于挪威海区南部2/7区块内，离陆地距离达320km，距东北部的巨型埃克菲斯克油田10km。埃达油田是北海已开发油田中最小的。该区水深约75m。

埃达构造为低缓的起伏，该构造于70年代初经地震勘探而被发现。该区块的第4口井位于埃达远景区内，2/7—4X井1972年6月开钻，发现了埃克菲斯克组的白垩—始新统是埃达的主要目的层。埃克菲斯克组的白垩厚达93m，孔隙度从好到差，在该组中仅有16m的地层石油饱和度超过50%，托尔组的白垩厚167m，由两个多孔的层段组成，上层段(T_1)原36m，平均孔隙度达26%，且含油，试井产率达$1050m^3/d$的原油和$275\times10^3m^3/d$的天然气，下层段(T_2)不含烃类。

2/7—4X井是埃达构造的发现井，原油发现于3207m以下(T_1底部)，水发现于3238m之下(T_2顶部)。

2/7—5X井钻于1972年底，它位于发现井东北部3km处，该井钻通的白垩层位要比2/7—4X井低15m，2/7—5X井水的饱和度大都超过70%，白垩的孔隙度为中等到差，根据该井的负面结果，认为在两井间的小型鞍部处存在渗透障壁。

第3口井，2/70—10X，于1973年钻在发现井面北1.3km处的低构造部位，在该处埃克菲斯克组缺乏孔隙，但托尔组为多孔隙含油的白垩层段，厚34m。该含油层位比2/7—4X井的含水层位要低一些，认为埃达是一多储集层油田，且有明显的油—水界面。根据已有的勘探资料，估算储量为$8\times10^6m^3$的石油，另外还有共生的天然气。

1978年底在2/7—4X井附近安装了开采平台。1980年石油开采达到高峰，日产原油为$5200m^3$。

埃达油田位于北海第三纪盆地的中心，其覆于中生代形成的中央地堑之上。该区的构造史对白垩油田的形成有重要的影响，只要注意下列几个时期的情况，便可加以解释。

(1)二叠系厚层盐沉积后的穿刺活动导致了该区的大部分成穹窿状；

(2)三叠系陆相层序沉积之后，在中央地堑形成显著的低凹，接受了非常厚的晚侏罗世海相黑色页岩(曼达尔组)沉积，成为该区有利的烃源岩；

(3)沉降一直持续到白垩纪和第三纪，形成了厚达3000m的白垩纪地层(主要为白垩)和3000m的第三纪地层(主要为页岩)；

(4)白垩纪和早第三纪间的构造脉动期引起了海底的不稳定，导致了相当规模的滑塌、滑坡，造成先前未固结的白垩沉积物被带到地堑的较深处，成为浊流、碎屑流及泥质物再沉积下来，这些异地白垩相构成了最好的储集层。

埃达油田的圈闭明显属于构造和地层相结合的类型。林讷(Lindesnes)海脊是形成地层圈闭的主要原因。油田面积为$10km^2$，盖层为第三系的厚页岩，油田至少含两个被致密带分开的石油聚集体。

储集层为埃克菲斯克和托尔组的白垩(图7—42)，埃克菲斯克组白垩孔隙度高达35%，而颗粒软泥在埋深3000m受正常的成岩作用，使它的孔隙度减少10%(±5%)左右。再沉积的白垩储集性能好、孔隙度高，尤以块状碎屑流沉积为最好。原地白垩(正常的深海颗粒较泥)储集性能差或完全丧失储集能力。

托尔组厚度为70～140m，为数个碎屑流和异地白垩所组成，具有原生孔隙高的两个主要储集单元(T_1和T_2)，这两个单元越过林讷海脊向西逐步变薄，如图7—43中所示。离开构造

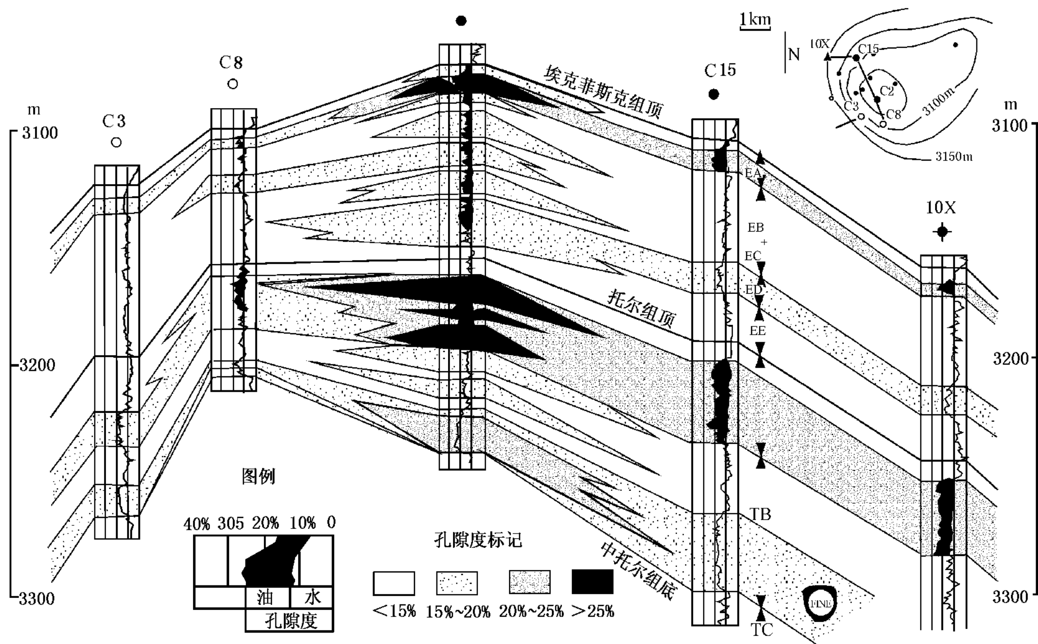


图 7－42　埃达油田储集层横向对比图

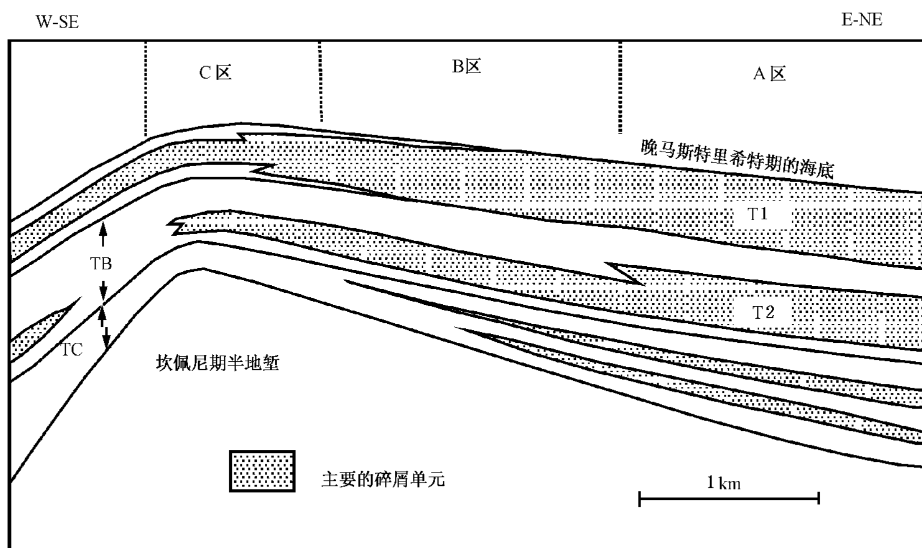


图 7－43　林讷海脊对储集层分布的影响

顶部，朝西南托尔组又快速变厚。丹麦阶地层厚度的变化具有类似的特征，表明在马斯特里希特阶末该海脊已完全被掩埋。埃达油田托尔组上部单元约含 84％的原始储量，余下的 20％分布在埃克菲斯克组的 3 个层段内。上层段由 10～15m 干净、多孔、渗透率很低的白垩组成，这种岩石当孔隙度小于 22％时就没有产能，另两个层段中的异地白垩有少量原油聚集。底部单元是典型的致密层段，由白垩与少量、薄层、远端的碎屑浊流沉积互层组成。

埃达构造紧靠中央地堑的轴部，该处上侏罗统源岩埋深常常大于 5000m，生油高峰被认为出现在中新世，而在西北部形成的大量石油早在古新世就开始了。原油密度为 0.83g/cm³。

埃达油田储集层具有非常低的基质渗透率，加之它的裂隙较少，它的产量是低的。1980年7口生产井达到了产油高峰，日产原油 5200m^3。1986年初每口井产量仅为 460m^3 的原油和 $230\times10^6m^3$ 的天然气。到1993年底该油田产量已达原油 $4\times10^6m^3$，天然气 $2.2\times10^9m^3$。

六、霍德(Hod)油田

霍德油田属于2/11区块，位于斯塔旺格西南370km处。北距瓦尔霍尔(Valhall)油田11km。该油田由两个构造圈闭组成，分别称作西霍德和东霍德，每个构造都有约 7km^2 闭合面积。该油田所处海域水深大约在70m左右。

该油田发现井2/11—2号钻于1974年，证明在霍德组地层中有50m高的纯油柱，古新世地层不整合于其上。该储集层质量非常好，然而，随后的评价钻探结果却出乎意料。2/11—3井钻于1977年，位于2/11—2发现井的东约2.5km处，该井位于东霍德构造的内部，有地震资料表明西翼白垩厚度增加，但白垩(霍德组)顶部出现在深度比预料低得多的构造位置上，表明有一个鞍状构造将东、西霍德分开。同时发现该处储集层(霍德组)结构致密且含水。于该井东南东1km处又打了一口井(2/11—3a钻在东霍德构造顶部)，发现了埃克菲斯克、托尔和霍德组的37m厚的纯含油层。依据2/11—3和2/11—3a两口井结果，对构造及地质模型重新进行了评价，于1979年在西霍德构造南翼钻了2/11—5井，目的在于寻找托尔组及埃克菲斯克组地层的良好储集层，该井发现了埃克菲斯克组，但仅见少量的油气显示。

1980年重新对该区进行详细的评价，并于1980年在东、西霍德构造间的鞍部安装了钻进平台底座。通过该钻井底座钻了2/11—6井，在托尔组和霍德组发现了78m的纯油柱。

对霍德油田的进一步评价完成于1985年，结果使储量大打折扣，对开发霍德油田的经济可行性引起了强烈怀疑，加之其他一些原因，至今还没对其开发。

霍德油田位于挪威中央海槽西南翼，影响油田的主要构造活动期出现在晚侏罗世与早白垩世。当然，其他的构造运动，如倒转、走滑(压扭和张扭)断裂运动及盐底辟作用对白垩储集层的特征及分布都有重要的影响。倒转运动开始于早白垩世，持续到晚白垩世和第三纪中期。沿林讷海脊及邻区追踪其运动史，对深入了解瓦尔霍尔和霍德的构造及地层的发展是很有价值的。

东、西霍德是成因和历史都不同的构造，西霍德直接上覆于林讷海脊上，其发展史与海脊的构造运动联系在一起。而东霍德似乎直接与其构造活动有关，但没有那么复杂。

霍德油田钻井一般仅钻到早白垩世晚期的地层，白垩群被分为5个组，其上部3个组(埃克菲斯克、托尔和霍德组)为潜在储集岩。霍德组又被进一步分为3个单元，分上、中、下霍德单元。

白垩的岩石学及沉积学已广为人知，它由浮游藻类的碎屑格架及数量不等的非碳酸盐碎屑、粘土及碳质所组成。非碳酸盐组分对储集层的质量危害很大，在油田中非碳酸盐组分含量很高。而在油田中作为储集层的白垩大部分为正常深海沉积物，包括远端浊流沉积，另外，异地组分也见及。白垩群之上覆盖超过2600m的罗加兰(Rogaland)、霍达兰(Hordaland)和诺尔兰(Nordland)群粘土岩(内含薄层粉砂岩，偶见砂岩)。它们构成了白垩储集层的巨厚盖层。

东、西霍德构造(图7—44)具有不同的成因及演化历史。西霍德的形成与沿林讷海脊构造运动紧密相关，构造活动似乎开始于早白垩世，并持续到第三纪中期。晚白垩世时，西霍德抬升非常强烈，由于运动的不协调使构造高点位置发生了迁移。霍德构造基本不受断层的影响，仅在圈闭高点两侧发现有断裂的小地堑切割了东霍德的高点，它的发育导致了在地堑内沉积和保存了埃克菲斯克和托尔组。在西霍德难于确定断层性质，但埃克菲斯克和托尔组的分布可能同样与断层有关，经霍德构造的一个示意性的剖面表示在图7—45中。

图 7—44　霍德油田白垩顶面构造图(单位:m)

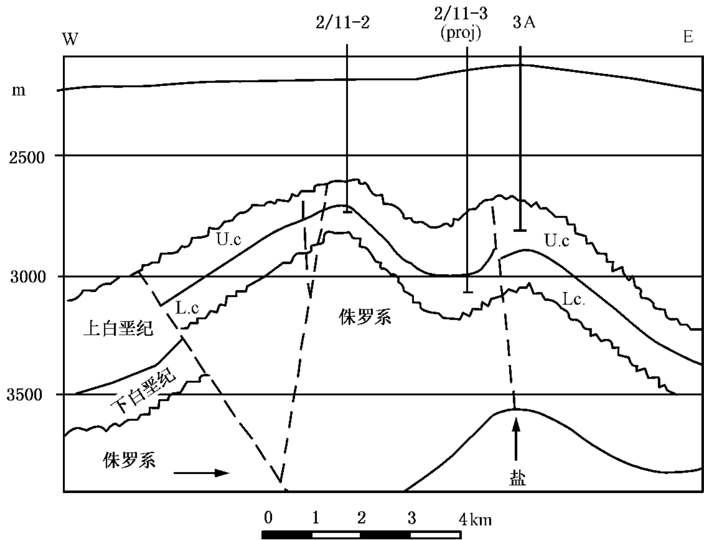


图 7—45　霍德构造剖面图

U. C—上白垩统;L. C—下白垩统

从白垩顶面构造图可知(图 7—44),西霍德存在着近 200m 的圈闭高度,东霍德约为 100m,白垩顶面构造溢出点西霍德是在海底以下 2775m,东霍德为 2750m。在西霍德石油出现在 2755m 的霍德组内,东霍德石油发现于 2822m 处,这低于标出的白垩顶部构造溢出点。

霍德油田的储集层为晚白垩世和早第三纪霍德、托尔和埃克菲斯克组的白垩,白垩相当不均一,垂向和侧向上的变化都很大,储集层孔隙率平均为 33%,一般在 24%～38%间,渗透率为(0.5～6.5)$\times 10^{-3} \mu m^2$。

据岩心及测井资料表明托尔和埃克菲斯克组主要是受生物广泛搅动的再沉积白垩,储集层质量非常好,颗粒比较大,缺失粘土及硅质。在霍德地区该两组地层的沉积分布与断裂活动紧密相关。

霍德组主要以深海沉积为主,储集层质量的好坏与碳酸盐组成的存在与否有相当大的关系,非碳酸盐部分平均为 20%,主要由粘土和硅质组成,其含量百分比随时间而变化,反映了沉积速率的变化,储集层质量也随之而变。

霍德油田油藏方面的知识仍然是不完整的,在西霍德的 2/11—2 井于中、上霍德组中发现了 47m 的含油层,该井油的饱和度随着深度而减小,这与“粘土基质”的增多及相应的孔隙度和渗透率的减少相一致。用水饱和度为 80%作为边界值,最下部的石油在 2/11—2 井位于 2682m 处。2/11—5 井在 2798m 处仅发现残留烃类。饱和度相对于深度剖面表明,油—水界面位于 2755m。

在东霍德 2/11—3a 井,托尔和埃克菲斯克组内发现了 40m 的含油层,还发现了 37m 含水层。2/11—6ST 井在托尔组发现了 12m 含油层。在霍德组发现了 66m 含油层。与之相反,2/11—3 井,即钻于东霍德的第一口井,发现的是致密的含水白垩(霍德组)。这说明了油藏的复杂性以及储集层质量的变化是很大的。霍德油田石油的密度为 $0.68 g/cm^3$。

霍德油田的石油可采储量估计为 $6\times 10^6 m^3$,然而,虽已提出许多开发方案,但由于其储量较小,加上地质条件的复杂,及开发遇到的困难,至今还没有一个可被接受的方案。

七、托尔(Tor)油田

托尔油田是根据挪威的雷电之神的名字命名的,位于北海挪威区的南部,距斯塔旺格西南约 310km,离埃克菲斯克油田东北约 13km 处,为盐穿刺形成的被断层所限的背斜,面积近 $18km^2$,该区水深约为 70m。

在勘探的早期,根据有限的地震资料,在埃克菲斯克构造东北识别出一个断裂构造,该构造当时被称为“Ergfisk”,即后来的托尔油田。托尔油田的发现井为 1970 年在 2/5 区块内的 2/5—1X 井,近于构造顶部,石油发现于晚白垩世和早古新世的白垩中,上覆厚达 3000m 的第三纪粘土,粘土岩及页岩下面石油达到饱和。

发现井总含油层段约为 200m,其中 150m 为纯含油层,最好的层段油气日流量为 $237m^3$ 的石油,$7.0\times 10^4 m^3$ 天然气。

托尔油田位于中央地堑的东北边缘附近,整个地堑以盆地拉张沉降作用为主,该区为白垩群及第三系的沉降中心,第三系构成了油田的储集层和盖层。

白垩厚度局部超过 1300m,已证实为异地白垩层,构成了最好的储集层,这些异地白垩层由原先沉积在地堑边缘斜坡不稳定的地段上的钙质软泥的再运动造成的,它被重力流搬到较深的地区,再沉积下来。

托尔油田受邻近地堑复杂断层带的影响,发育着滑塌、滑动席状体和广泛分布的碎屑流沉

积，这是白垩层内比较普遍的沉积特征。由于构造与沉积作用的同时性，导致了托尔油田异地白垩的不均匀分布，另外还有局部小型的改造出现于白垩群的顶部。

托尔构造中白垩储集层的圈闭是由盐穿刺引起的构造运动以及第三系页岩封盖形成的，该构造成宽缓椭圆形（8×4.5km），由一个大的穹窿及小穹窿组成，两个构造的顶部都发育有断层（图7—46）。白垩群顶面垂向闭合高度为240m，东部构造顶部比主要构造顶部要低120m。托尔组顶部构造特征非常类似于埃克菲斯克组顶部观察到的那些特征。在油层之下，由于晚期成岩作用降低了孔隙度，一般为非渗透层，但在构造西南及东南3350m以下，发现分布范围有限的含水层。

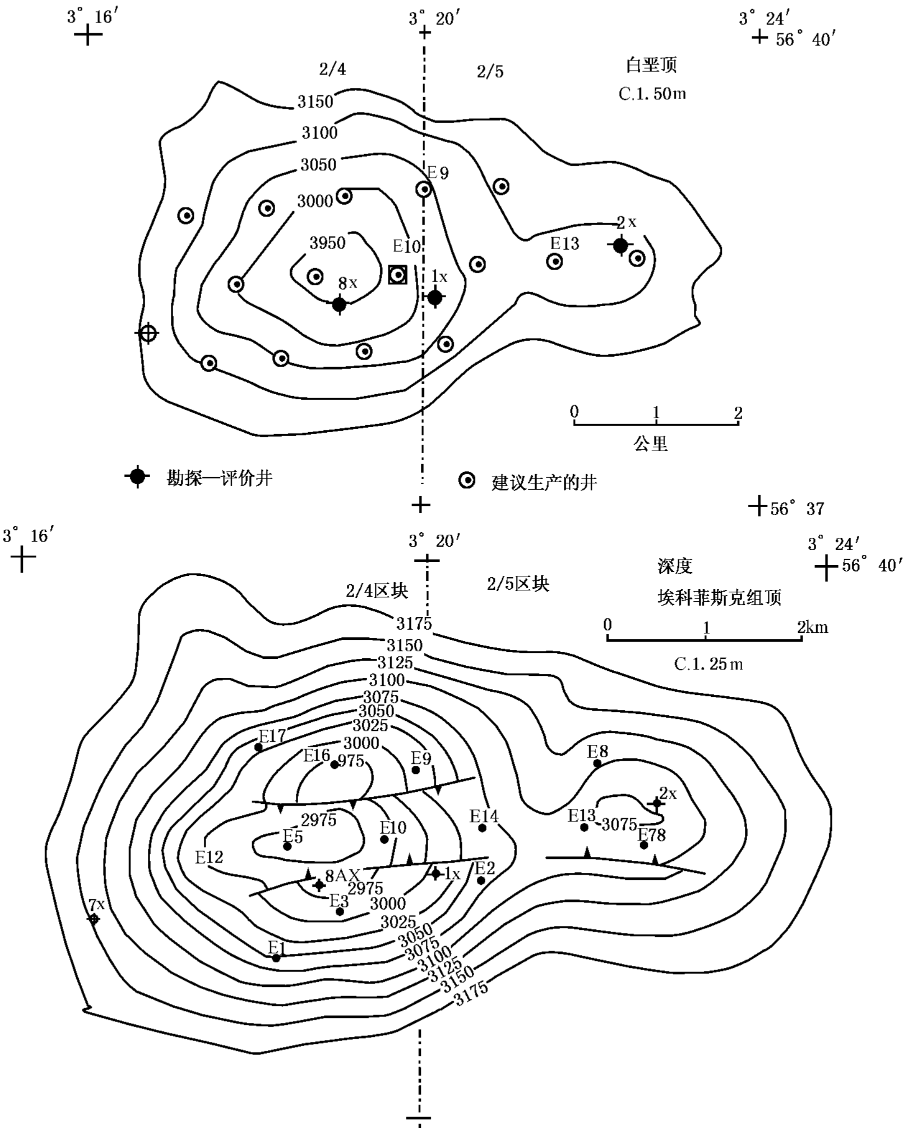


图7—46　托尔油田白垩层顶面（勘探前期）及埃科菲斯克组顶面构造（单位：m）

托尔油田储集层由上白垩统（马斯特里赫特阶）和下古新统（丹麦阶）的白垩组成，在该区称为托尔组和埃克菲斯克组地层。

中央地堑的白垩颗粒最大，特征是具有非常高的原生孔隙，并在长达60Ma的逐步深埋过

程中这些孔隙保存得非常之好，所有的孔隙都是骨架型的，裂隙型孔隙则微不足道。具有很高原生孔隙的原因，可能是因为快速沉积的异地白垩所占比例很高，逃脱了生物搅动以及重要的早期胶结作用。而原油及时进入储集层，在邻近孔隙抑制了压溶及重结晶作用的发生，也是使孔隙保存如此之好的主要因素。

托尔油田储集层的孔隙分布是多种有利因素共同作用的结果。托尔油田中各储集层的概略情况自下而上简述如下（图 7—47）。

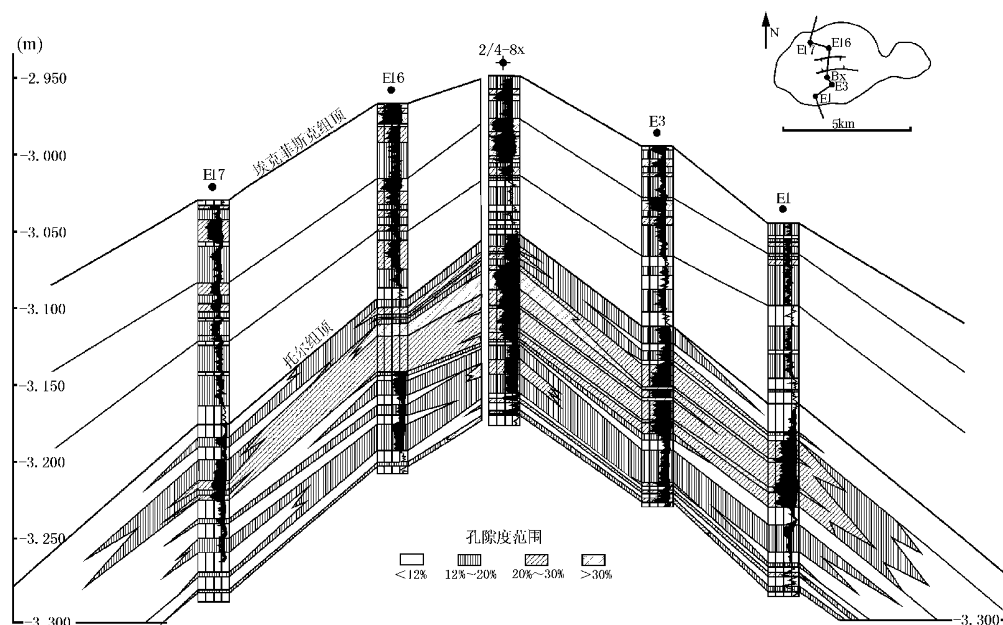


图 7—47　托尔油田储层对比图

托尔组地层可分为 3 个单元，下托尔单元主要由深海白垩组成，粘土含量较高，除某些多孔的碎屑流沉积层外，储集层性能很差，平均孔隙率为 16%，多孔的碎屑流沉积层厚达 3～5m。仅在主构造顶部含有原油。中托尔单元由原地白垩及异地白垩互层组成。含较多生物碎屑，局部粘土含量较高，平均孔隙率为 16%左右，储集性能良好。上托尔单元由 TY 和 TZ 两个层段组成。TY 层段，为托尔油田的主要储集层。这个层段以及托尔组中、下单元，可以从一个油田对比到另一个油田，表明它具有一定区域稳定性沉积，孔隙率平均为 27%。TZ 层段平均厚度 20m，由薄的碎屑流以及浊流和深海沉积互层组成。该层段尽管孔隙度较低（平均为 19%）。但原油饱和度高，它从构造顶部向西翼变厚（图 7—47）。

埃克菲斯克组地层分为两个单元。下埃克菲斯克组以正常的深海相为主，以发育大量生物钻孔的白垩为特征，非碳酸盐成分所占比例高，储集层性能极差，孔隙率平均为 14%。上埃克菲斯克单元，主要由储集性能良好的碎屑流沉积所组成，硅质及粘土含量比较大，油田内难于进行对比，最上部的地层缺失，反映丹麦阶末的抬升和剥蚀，孔隙率平均为 22%，从构造顶部向侧翼孔隙减少，岩心研究表明在隆起区内发育着相当多的裂隙（图 7—47）。

托尔油田于马斯特里赫特阶和丹麦阶时就已有古构造存在，当古新世粘土有效地盖住白垩时，圈闭即已形成。在储集层中适时充满原油，可能是使孔隙得以保存的主要因素。Hardman 及 Leonard 和 Jansen 已证实超压本身至少可以保护 26%的孔隙，然而油田储集层孔隙度却高达 35%～50%，在这些地方，都是有原油或曾有过原油的储集层。数口井的含油段观察

到孔隙度从大于40%，相当快地减少到约为25%时，则含油饱和度就相当差了，而在含水层中记录到孔隙度减少趋势要慢得多。埃克菲斯克组和托尔组中所含的原油相类似，密度为$0.8155g/cm^3$，低硫，饱和压力为305×10^5Pa，GOR约为$260m^3/m^3$。

托尔油田可采储量估计为$18\times10^6m^3$的原油和$12\times10^9m^3$的共生天然气。1985年末，已开采了83%的可采储量，日产量为$2000m^3$原油及$2.6\times10^6m^3$天然气。

八、尤拉(Ula)油田

尤拉油田全部位于7/12区块，出现在斯塔旺格西南约260km处。它坐落在中央地堑区内，埃克菲斯克复合体白垩油田西北65km处，水深为70m。

1976年夏天钻了7/12—2井，出乎意料地钻透了厚厚的(154m)储集性能良好的上侏罗统砂岩，该砂岩全部含油。钻遇的三叠系含油砂岩剖面，由于孔隙度低，渗透率也较差，试井时仅获少量石油和水。

该油田于1985年才开始安装生产平台，1986年底开始正式生产，高峰生产率为$11750m^3/d$，油田的经济生命为11a。

尤拉油田位于中央地堑东北边缘断裂带内，地堑边缘断层在晚侏罗世时为生长断层，断距达数百米，浅海砂岩堆积在断层下降盘的地形低凹处，但朝盆地方向尖灭。尤拉组浅海相储集砂岩，厚度变化范围为84m(断层破坏)到166m，上覆为厚度超过100m的上侏罗统泥岩和页岩，晚侏罗世到现代的剖面基本上是连续的，不含储集层段。

尤拉构造形成于蔡希斯坦统盐隆之上，圈闭是在第三纪时形成的，东北部以Hidra断层带为界(图7—48、7—49)。含油面积为$11km^2$，垂向延伸约为160m，垂向盖层为上侏罗统泰恩(Tyne)群的泥岩和页岩。

尤拉油田储集层为上侏罗统称作尤拉组的砂岩，对钻井中储集层所做的详细的岩石学和测井曲线研究，将储集层分为5个非正规的岩石单元(图7—50)。单元Ⅴ为薄层砂岩，向上逐步变为单元Ⅳ的粉砂岩，单元Ⅲ和Ⅱ为两个主要的储集层。单元Ⅰ为由较细粒的、分选不太好的砂岩组成，含较多的垂向生物潜穴。垂向颗粒变化表明单元Ⅴ—Ⅳ—Ⅲ层序代表了海侵而后为海退过程，单元Ⅰ被认为是一个海侵层序，单元Ⅱ和Ⅲ都显示向上变粗的特点，认为属广泛海退层序。

所有的钻井都钻遇上述的岩性单元。孔隙度和渗透率的变化主要与不同沉积单元的结构、成熟度及颗粒大小的变化有关。含油层段平均孔隙度从15%～20%(单元Ⅰ—Ⅲ减少到细粒单元的12%～17%)，渗透率变化范围为$0.2\sim2800\times10^{-3}\mu m^2$，单元Ⅱ中平均为$650\sim850\times10^{-3}\mu m^2$，单元Ⅳ和Ⅴ不含有效储层，单元Ⅰ和Ⅲ储集层纯厚与总厚之比为0.93。

除尤拉组外，在该构造中的三叠系斯卡格拉克(Skagerrak)组也含有石油，在7/12—2井曾从该组储集层开采出少量石油，7/12—6井再一次在斯卡格拉克组内发现了石油，但产率很低。

尤拉油田的油源岩是上侏罗统曼达尔组的“热页岩”，这是该构造带内惟一有意义的生油源岩。它的平均厚度为36m，S_2 Rock—Eval产能高达21kg/t。曼达尔组正好处于油窗范围内，在中晚第三纪时，产生大量的石油和天然气。在含油层中天然气处于溶解状态。

尤拉组含油层各段经过6次测试，单元Ⅱ储集层产率最高($1100m^3/d$)，7/12—2井及7/12—2井测试结果表明获得无水原油最大深度为3057m和3505m，7/12—3A井的测试结果表明在3509m已是100%的水，因而该油田中的有效油水界被定在3508m处。

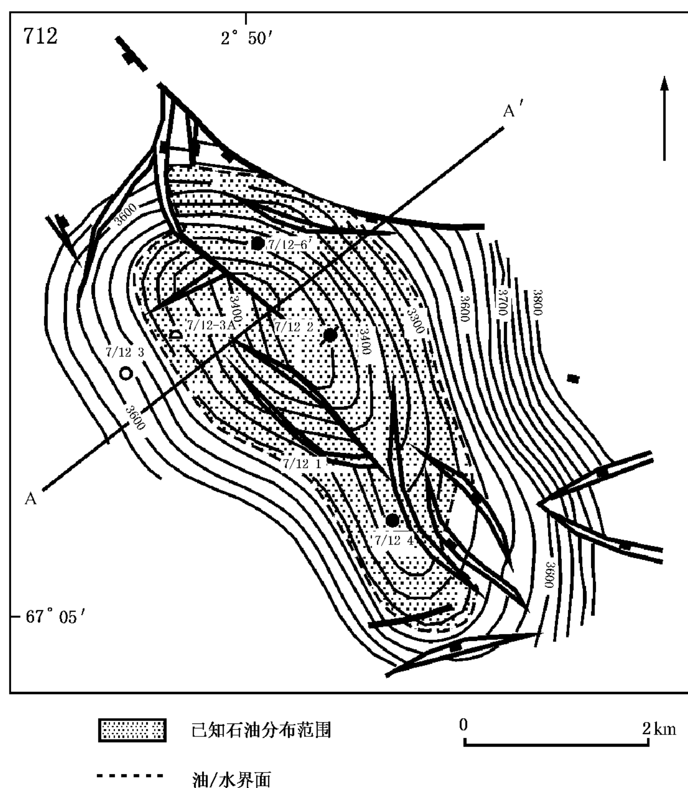


图 7—48　尤拉油田构造图

（等值线表示储集层顶面的深度，等值线间隔为 20m）

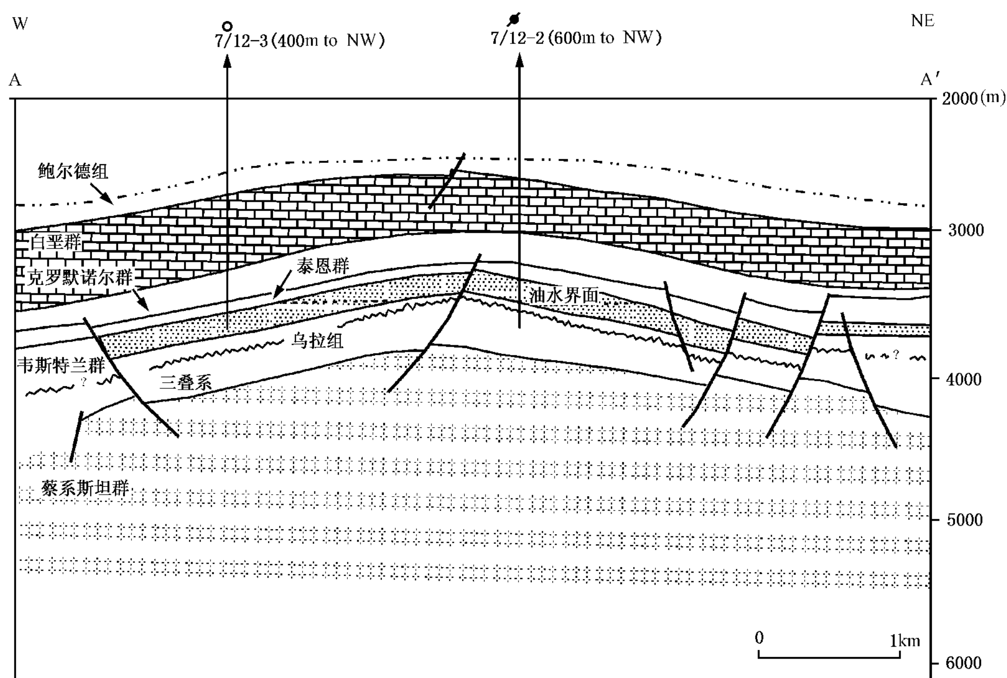


图 7—49　穿过尤拉油田的剖面图

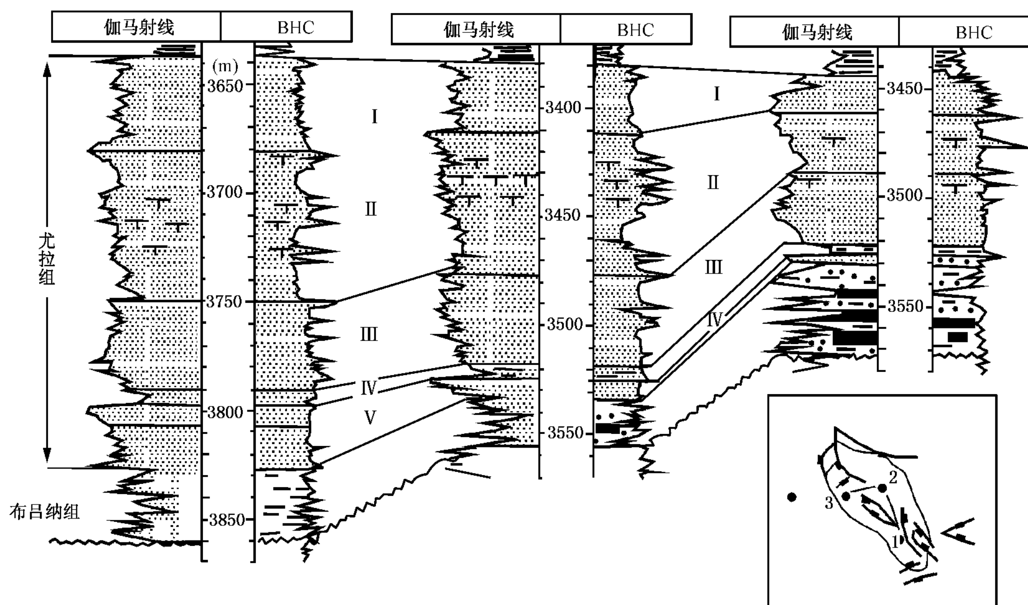


图 7—50　尤拉油田尤拉组内岩石单元划分

该油田的原油密度为 0.83g/cm³，为低硫(0.1%)高蜡(9%)型原油，根据已有勘探结果估算其储量为 25×10⁶m³ 的原油和 2.5×10⁹m³ 的共生天然气。烃类饱和度为 0.75～0.97，最终的采收率预计可达约 40%。

九、瓦尔霍尔(Valhall)油田

瓦尔霍尔油田，位于斯塔旺格西南约 300km，处于北海挪威区的最南部，它横跨 218 和 2/11 两个区块，油田区水深为 6.5～70m。

1975 年初在构造顶部打了 2/8—6 井，钻遇厚达 100 多米的白垩含油气层，被认为是油田的发现井，油田开发始于 1981 年 12 月，1985 年 6 月生产达到高峰，日产 11000m³ 原油和 1.8×10⁶m³ 的天然气。

该油田位于中央地堑西南翼附近，这是一个三叠纪时就已存在的内克拉通裂谷带。油田内钻遇最老的岩石是晚侏罗世地层。该油田经钻井控制，地层可分为 3 个主要层段，即上侏罗统到下白垩统勒兹比组的页岩、上白垩统的白垩群以及第三系的页岩。

瓦尔霍尔油田位于储集层顶面积达 280km² 的大构造圈闭内。该构造不对称，有一个陡的西翼和较平缓的东翼，该油田被 WSW 向的左旋走滑断层分隔为许多分隔的区块(图 7—51)。在油田北端轴部形成了不连续的地堑，该地堑在油田南东端，受走滑断层的侧向运动而分叉(图 7—51)。

瓦尔霍尔油田的构造发展与林讷海脊的运动紧密相关，正如图 7—52 所示，现在的形态是经历了至少 3 个主要变形阶段的结果。

(1)第一阶段(晚侏罗世—早白垩世时期)构造作用导致了快速沉降，形成含数千米沉积物的半地堑；

(2)第二阶段包括林讷海脊西翼的抬升，引起局部出现挤压，导致了早白垩盆地的倒转，使上白垩统最薄的地方，出现于倒转前下白垩统厚度最大的位置。

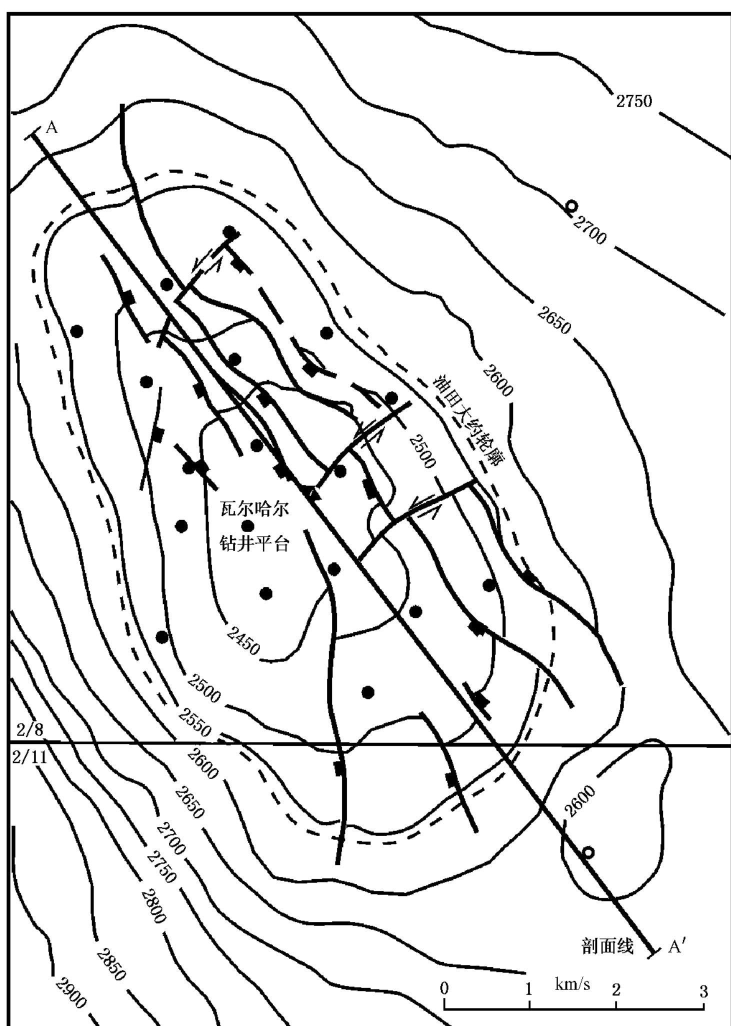


图 7—51 瓦尔霍尔油田白垩顶面构造图(单位:m)

(3)始新世和中新世林讷海脊的阶段性活化,形成了油田的不对称特征。

该油田的顶部处于海底以下 2400m 处,构造圈闭延伸到约 2760m,闭合差达到 360m。目前已知原油出现最大深度为 2620m,然而水饱和度达 100%的位置,深度有的却仅在 2588m,这表明在整个油田中油水界面是不一致的、可变的。

瓦尔霍尔油田的含油气层段出现在林诺曼阶—马斯特里赫特阶的白垩中,可分为 8 个带,区别各带的储集层特征的标志主要是通过沉积环境及岩石中非碳酸盐物质的含量不同而划分的。储集层质量变化的第二影响因素是白垩的矿物成分。在某些地层,如上托尔单元,几乎是由 100%的碳酸盐组成,其他层段中含有的次要组分在岩石中占有的比例相当大,个别情况下,粘土和硅质等组分可达 50%。

该油田中主要储集层为托尔组,将近 70%的原油产于此层段中。在油田内托尔组的厚度变化很大,孔隙度变化也较大,既从油田构造顶部孔隙度几乎达到 50%变为侧翼的 20%,该组高孔隙度的保存主要是由于储集层的超压造成的。

霍德组的孔隙率变化为 20%~40%,托尔组渗透率一般为$(2\sim10)\times10^{-3}\mu m^2$,而霍德组

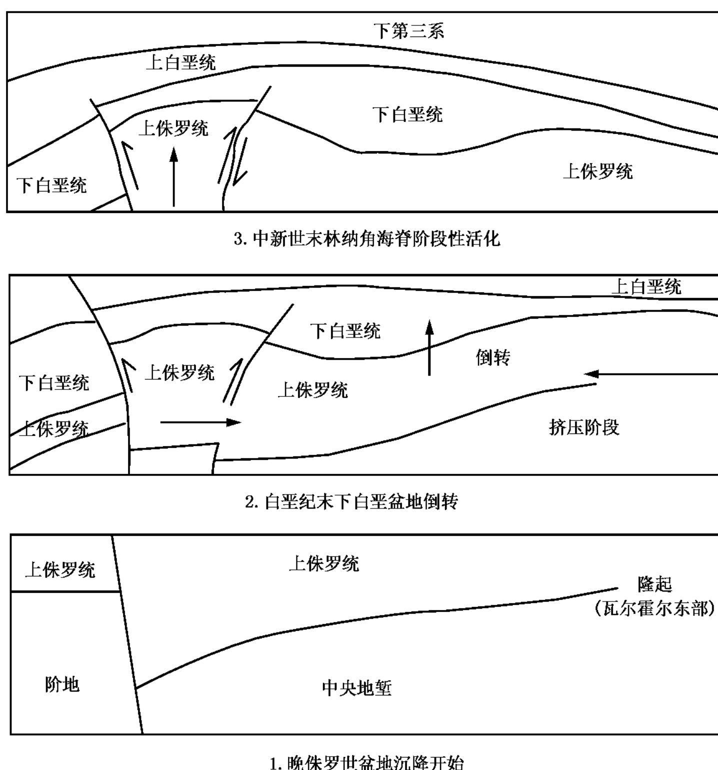


图 7—52 瓦尔霍尔油田的构造演化

的典型值不到 $2\times10^{-3}\mu m^2$，构造顶部钻井中取得的托尔组有效渗透率为$(20\sim90)\times10^{-3}\mu m^2$，说明裂隙可能起了作用，使有效渗透率增加了 10 倍。

瓦尔霍尔油田的原油为石蜡基石油，密度为 $0.845g/cm^3$，估计原地的石油储量为$(233\sim429)\times10^6m^3$。最近给出的一个原油估计值为 $259\times10^6m^3$，其中 70%出现在托尔组内。

十、古尔法克斯(Gullfaks)油田

古尔法克斯位于卑尔根西北 175km 处北海挪威区内，该地区含数个令人感兴趣的含油气构造，古尔法克斯油田是其中最大的一个，该构造面积为 $47km^2$，处于 34/10 区块内，水深范围 135～220m，向北东方向深度增大。

34/10 区块第一口井于 1978 年 7 月完钻，并获得成功，钻遇的布伦特群是产油的，其下的库克和斯塔福约德组是含水的，34/10 区块第二口井在布伦特群打到了天然气，在斯塔福约德组打到原油。开采工作开始于 1986 年，1988 年底正式投产。1993 年整个油田的总产量达到最大值$(228\times10^6m^3/a)$，该油田共安装 3 个平台，A 和 C 平台，日产 33000t 原油及 $3.5\times10^6m^3$ 天然气，B 平台日产 20000t 原油。

古尔法克斯构造形成于晚侏罗世至早白垩世的区域构造运动中，该构造的主要部分受到强烈的块断作用，而且被旋转。但断块Ⅰ(图 7—53)所受影响较小，向上突起而成为地垒。N—S 向的断层将油田分为数个旋转的断块，在构造东部的断块上，布伦特和库克砂岩被部分地或全部地剥蚀掉(图 7—53)。

地震解释表明古尔法克斯油田为一向西倾斜的断块系统，由宽 1～2km，N—S 向排列的

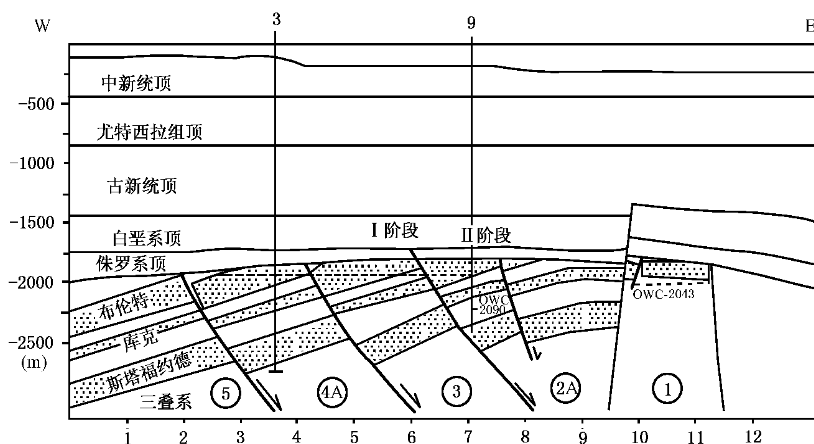


图 7—53　古尔法克斯油田断块封隔平面及横剖面图

owc **为油水界面**

小断块组成，主要的储集层为侏罗系砂岩，以上侏罗统页岩作为油源岩，白垩系页岩提供了良好的封盖条件。原油主要储存在布伦特砂岩中，油—水界面为 1947m，**油—水界面在库克组为** 2090m，**在斯塔福约德组为** 2043m。

另外，在深度为 300～450m **的全新世地层中钻到了含气砂岩，砂岩的厚度为** 1～5m，**分布**

面积为 6～8km^2，所谓的“浅层气”井也打了一些，并对它们进行了测试。现将各主要储集层情况自下而上简述如下。

斯塔福约德组（81～224m）含油储集层主要在断块Ⅰ内（图 7－53），该组一般分为 3 个单元，单元Ⅰ由互层状砂岩、粉砂岩和页岩组成，曾观察到厚达 16m 的砂体，单元Ⅱ和Ⅲ由互层状砂岩、粉砂岩和页岩组成，一般厚度为 3～10m 的向上变细层序构成，每个层序的中粒砂岩，厚始沉积构造一般保存良好，局部地方砂岩被胶结，在砂岩中孔隙度和渗透率分别为 19%～30%和（30～3000）×$10^{-3}\mu m^2$。

库克组（井中厚度为 106～150m）一般分为 3 个单元，由沉积在开阔海和局限海条件的页岩、粉砂岩和砂岩组成。该组在油田的南部厚度最大。成岩作用对孔隙/渗透性质的总体影响不很大，孔隙率为 20%～36%，渗透率为（1～1000）×$10^{-3}\mu m^2$。

布伦特群可分为塔伯特、莱斯、埃蒂夫和瑞纳奇组，储集层一般为长石、石英砂岩。瑞那奇组（井中厚度为 48～91m）一般为三角洲前缘沉积，该组可分为 3 个储集单元，R_1 为泥质云母质砂岩；R_2 和 R_3 为极细粒到细粒、分选良好的云母质砂岩。就颗粒大小而言，R_2 单元最均一。平均孔隙度为 30%，渗透率为（50～800）×$10^{-3}\mu m^2$。

埃蒂夫组（井中厚度为 13～38m）解释为上三角洲复合体，该组的储集性能上乘，平均孔隙度达 32%，渗透率为数个达西。

莱斯组（井中厚度为 79～105m）可分为 3 个单元：N1、N2 和 N3N1 和 N2 代表下三角洲平原相；N3 为上三角洲平原相。砂岩平均孔隙度大于 15%，渗透率达 1μm^2。

塔伯特组（井中厚度为 46～75m）可分为 2 个单元，这 2 个单元被解释为潮汐/河流占优势的三角洲体系，T1 和 T2 都含大量次生高岭石，尽管这样，砂岩仍具有良好的储集性能。

在 3 个储层中，原油是低成熟的。斯塔福约德组的油气，储量主要在断块Ⅰ，库克组储量在断块Ⅱ，布伦特群储量在断块Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ均存在，而且在断块Ⅵ上也可能有。原油密度在布伦特群、库克组和斯塔福约德组分别为 0.88g/cm^3、0.85g/cm^3 和 0.83g/cm^3。

该油田的总储量估计为 635×10^6m^3，其中 10%在库克组，11%在斯塔福约德组，其余均储于布伦特群地层中。预计在布伦特群和斯塔福约德组的原油的采收率较高，库克组的采收率可能较低（26%），这是因为渗透率很低的层段占据了该储集层的大部分。3 个储集层流体性质不一样，从西到东原油密度减小，气—油比率则增大。可采储量在布论特群为 179×10^6m^3，库克组为 12×10^6m^3，斯塔福约德组为 19×10^6m^3。

十一、默其松(Murchison)油田

默其松油田位于卑尔根以西约 250km 处，距东南部的斯塔福约德油田 10km。该油田 75%的储量在英国的 211/19 区块，25%在挪威的 33/9 区块。油田面积约 17km^2，该处海水深为 156m。

默其松油田发现于 1975 年 8 月，确定的油—水界面（该界面以下水饱和度基本为 100%）为 3080m，应用英国和挪威（PL037）的物探资料解释结果表明该油田一直延伸到挪威的 33/9 区块。因此该油田是属两国共有的。

默其松油田位于维京地堑西侧的东设得兰盆地，具有与斯塔福约德、希斯尔和都林油田相同的沉积和断裂走向。该油田的主要构造单元为大型的向北西倾斜的矩形断块，它由中晚侏罗世断块作用、掀斜以及侵蚀造成的，东西两侧以 NW 向正断层为界，断块南部被复杂的 ENE 向断层所切割，3 个边都是以断层为界（图 7－54）。它是一个地垒块体控制的圈闭。

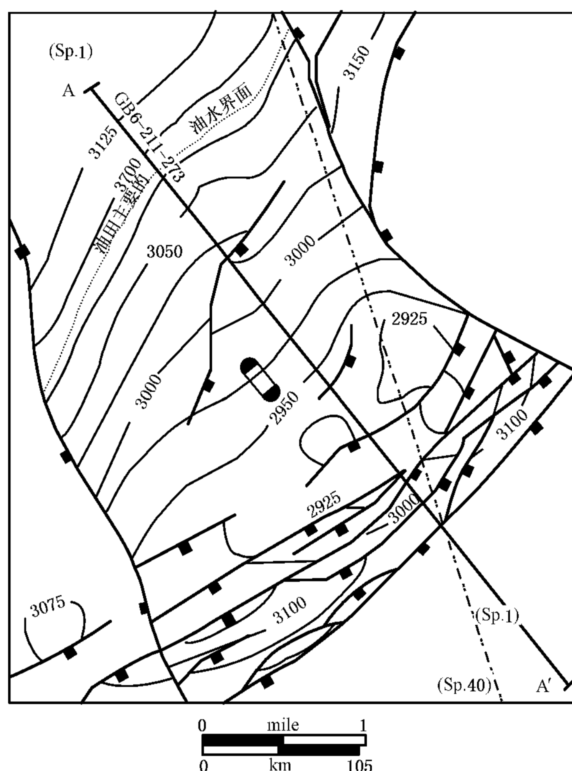


图 7—54　布伦特群顶面构造图(单位:m)

中侏罗统布伦特群代表了一个主要的陆源碎屑楔状体,为东设得兰盆地提供了重要的油气储集层。布伦特群油田的平均厚度约为 130m,可分为 7 个层段,其中 5 个为储集层段。不整合上覆的上侏罗统和下白垩统页岩构成盖层。

该油田石油聚集在晚启莫里阶拉张运动形成的构造圈闭内,伴随间歇性的断块旋转,一直持续到侏罗纪结束,该油田的油—水界面局限在西北部,该界面横切平缓向北西倾斜的布伦特层段(图 7—55)。近于平行的油田边界断层系统,走向为东南,断距在 150m,将石油的聚集限制在西部和东部。油田南部和东南部出现一系列断块,其断距为 20～140m 不等,主要向南东倾斜。

该油田储集砂岩,主要为中侏罗统(阿连阶—巴通阶)的布伦特群。它由 7 个亚单元组成,其中 5 个为储集层段,现简述如下。

(1)下页岩单元:取自该单元的岩心显示了风暴形成的波痕,风暴的间歇期发生生物搅动及泥质沉积,1m 厚的布鲁姆砂层覆盖在约 15m 厚的海相前三角洲粘土之上,该单元为非储集单元。

(2)下云母砂岩单元:总厚度为 15～18m,由细粒云母砂岩组成,其中有 2～4m 为储集层,孔隙率为 15%～16%,油饱和度为 55%,该单元所含原油仅占整个油田原油的 1%。

(3)上云母砂岩单元:它由细粒云母砂岩组成,孔隙度为 20%,油饱和度 75%,总厚度为 35～60m,估计含 29%的原油,这两个云母砂岩单元较之上覆的层段储集性能要差,它们相当于北北海其他地方的瑞纳奇组,已有资料证明该单元在油—水界以下孔隙度/渗透率的减少与成岩作用有关。

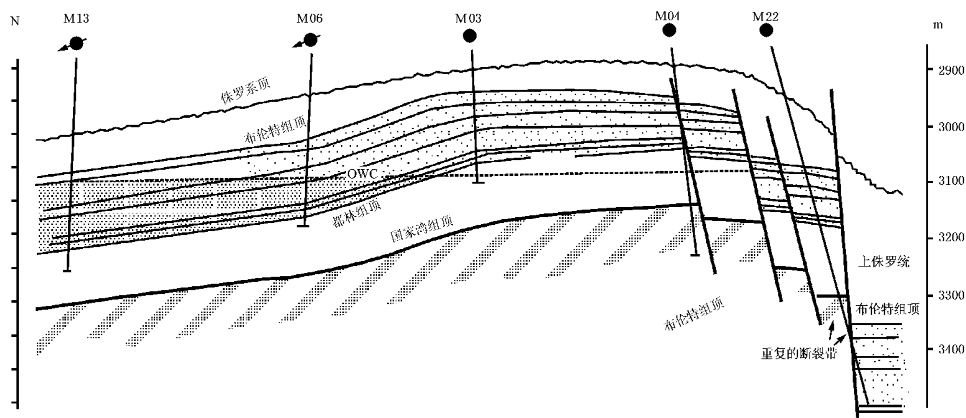


图 7－55　默其松油田东部构造横剖面图

(4)块状砂岩单元:由细到中粒砂岩组成,总厚度为 20～33m,平均孔隙度为 23%,油饱和度为 82%。该单元下部层段孔隙度良好(21%～26%),渗透率达 4μm^2 以上,最高处达 10μm^2。估计该单元占油田 32%的原油,它相当于埃蒂夫组。

(5)中页岩下部单元:是一典型的三角洲顶部相,由多层砂岩以及泥岩和煤炭沼泽沉积组成。平均厚度 25～30m(最大达 60m),该单元相当于下莱斯组,估计含 23%的原油。

(6)中页岩中部单元(相当于中莱斯页岩):为一非储集单元,它厚近 5m,成为中页岩单元上、下层段间有效的垂向流体/压力障壁。

(7)中页岩上部单元:该层段平均厚度为 15m,孔隙度为 20%,估计占 14%的原油,它相当于上莱斯组和塔伯特组。

211/19－2 发现井对布伦特云母砂岩的两次钻杆测试,用 32/64 英寸油嘴,获得 890m^3/d 和 215m^3/d 的原油,以后的测试,用相同尺寸的油嘴,获得 800m^3/d 的石油,第一口开采井为 M01 井,在 17 个月的试采后产量达到高峰,日产原油为 4300m^3(用 140/64 英寸油嘴)。原油的密度为 0.83g/m^3。

整个油田最初估计的可采储量为 $51\times10^6m^3$ **石油，**2×10^6t **的凝析油和** $3.9\times10^6m^3$ **不溶天然气。**1983 **年估算原油为** $125.5\times10^6m^3$**，其中** $94\times10^6m^3$ **或** 75% **在英国一侧，**$31.4\times10^6m^3$ **或** 25% **在挪威一侧。布伦特储集层中可能占油田储量的** 84%**。**

十二、奥塞贝格(Oseberg)油田

奥塞贝格油田发现于 1979 **年，该油田包括现在挪威** 30/6 **区块和** 30/9 **区块内的阿尔法、北阿尔法和伽马** 3 **个构造，距南东东方向的卑尔根约** 140km**，该地水深为** 125m**。**

第一口井(30/6—1)**于** 1979 **年钻在阿尔法构造的构造高点**(**图** 7—56、**图** 7—57)**。在布伦特薄砂岩中发现了天然气，斯塔福约德组是含水层，而古新统中没有有意义的砂岩发育。**1981 **年** 30/6—4 **井打在下倾位置，在布伦特群发现了完整的油柱。另外发现埃蒂夫组的储集性能和厚度较以前的钻井中见到的要好得多，**1982 **年** 30/6—6 **井确定了油水界面**(OWC)**约在** 2710m **处。**

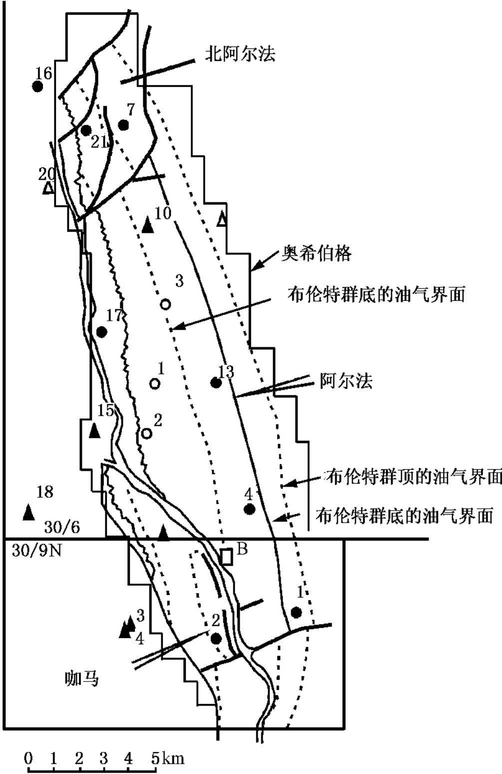


图 7—56 **奥塞贝格油田示意图**

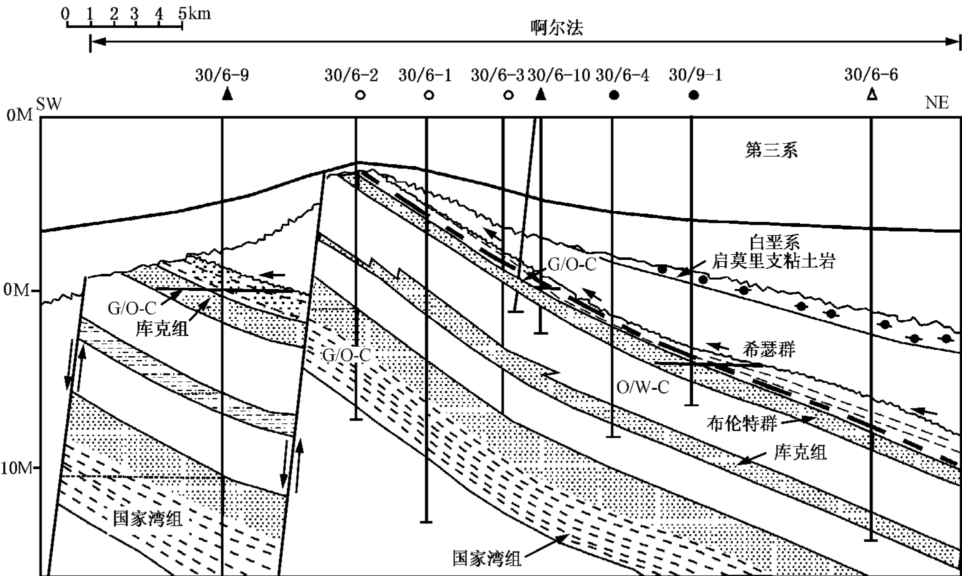


图 7—57 **南西—北东向示意横剖面**

G/O—C—**油气界面**；O/W—C—**油水界面**

30/6—7 井位于北阿尔法构造，该井证明这个构造含油，另一口井，30/6—9 井，在伽马构造获得非常好的结果，并发现储集层厚度较阿尔法有明显增加，储集性能极佳。1983 年 8 月确认奥塞贝格油田具有商业开采价值，1989 年 4 月 1 日正式投产。

30/6 和 30/9 区块含有数个令人感兴趣的发现区和远景区。奥塞贝格油田位于维京海槽和较稳定的霍达台地之间的过段地带。北北西—南南东向断层的长期活动，造成布伦特沉积期间阿尔法和伽马两个构造表现出沉降差异。北东—南西向断层通常是间断性活动，活动时间较晚，而且还受非拉张应力的影响。

该油田是一断层圈闭，储集层顶面构造圈闭高差约为 600m，盖层是由希瑟组和白垩系灰岩及页岩组成的，构造顶部发现于 30/6—2 井的西南，约在 2120m 处。

作为该油田储集层的布伦特群，其厚度是受构造控制的。奥塞贝格断块（阿尔法，北阿尔法及伽马）的向东掀斜及中侏罗世后的侵蚀导致了布伦特群在下降端变厚（下倾方向依次出现较新的岩石地层单元）。埃蒂夫和塔伯特组的砂岩中也发现了烃类。埃蒂夫组由侧向连续性好的粗粒砂岩组成，厚度近 40m，大部分都具有非常好的储集性能。莱斯组砂岩在某些情况下储集性能尚好，但侧向及垂向的连续性较差。塔伯特组发现于油田的东北部，由连续的砂岩席状体组成。砂岩孔隙率为 22%～26%，渗透率为 $(1\sim3500)\times10^{-3}\mu m^2$ 平均渗透率高达 $2\mu m^2$。

在埃蒂夫组含烃带内观察到极高的产率，对于含油层段为 415～1950m^3/d/bar，对于含气层段为 360000～780000m^3/d/bar，这些数字是从测试资料的解释得出的。原油密度为0.857g/cm^3。

奥塞贝格油田的可采储量为 $153\times10^6m^3$，约 43%为原油，另外，从天然气的开采中可回收 $7\times10^6m^3$ 的凝析油。天然气体积为$(50\sim70)\times10^9m^3$，由于勘探的发展，原油可采储量已增加到 $203\times10^6m^3$。

十三、贝里姆(Bream)和布里斯林(Brisling)油田

贝里姆和布里斯林油田处水深为 100m，位于斯塔旺格西南 135km 的地方。它们完全包括在 17/12 区块内，尽管它们只相隔 14km，但它们的地质背景完全不同。贝里姆位于埃格桑盆地内，而布里斯林处于塞莱隆起上，储集层为卡洛夫阶的砂岩，上覆了既是源岩又作为盖层的上侏罗统页岩，总资源量估计不到 $2\times10^6m^3$。

贝里姆构造在中侏罗统反射层面的闭合面积为 $80km^2$，中侏罗统砂岩是主要目的层，下白垩统及三叠系砂岩为次要目的层。对含油层厚度达 15m 的储集层进行试采发现，通过 8/64in 油嘴获得 32.4°API(0.863g/cm^3)的原油日产是 $160m^3$，在 2315m 处有一油/水界面，较老的巴通阶—巴柔阶的砂岩及三叠系砂岩为含水砂岩。

1973 年在布里斯林构造上开钻，中侏罗统层位闭合面积约 $40km^2$，在 2130m 处发现了中侏罗统砂岩，时代为巴通阶至卡洛夫阶，厚度为 13m，油/水界面出现在 2138m 处。此外还发现巴柔阶地层直接覆于蔡希斯坦统之上，再向下，该井钻到了下三叠统 7.5m 的砂岩，完井于 2334m 深度，可能为泥盆纪地层中，经对 4m 厚的砂岩层段进行测试，通过 24/64in 的油嘴日产油为 $366m^3$。

早二叠世陆相（布里斯林井中为 8m 厚的细粒砂岩）沉积之后，晚二叠世海水的侵入导致了蒸发岩沉积旋回的形成。钻井在塞莱隆起上发现了 20m 的白云岩和灰岩，在埃格桑盆地中的 17/12—1 井钻达至蔡希斯坦统的盐层中。勘探表明在侏罗纪之前这两个地区可能已经存在地形差异。在贝里姆和布里斯林钻遇的地层很不同，可能主要是侏罗纪以来差异运动及剥蚀造成的（图 7—58）。在塞莱隆起上，中侏罗统砂岩位于二叠系碳酸盐岩之上；在埃格桑盆地

中，中侏罗统之下见有厚度超过1600m的三叠至斯卡格拉克组的沉积物。

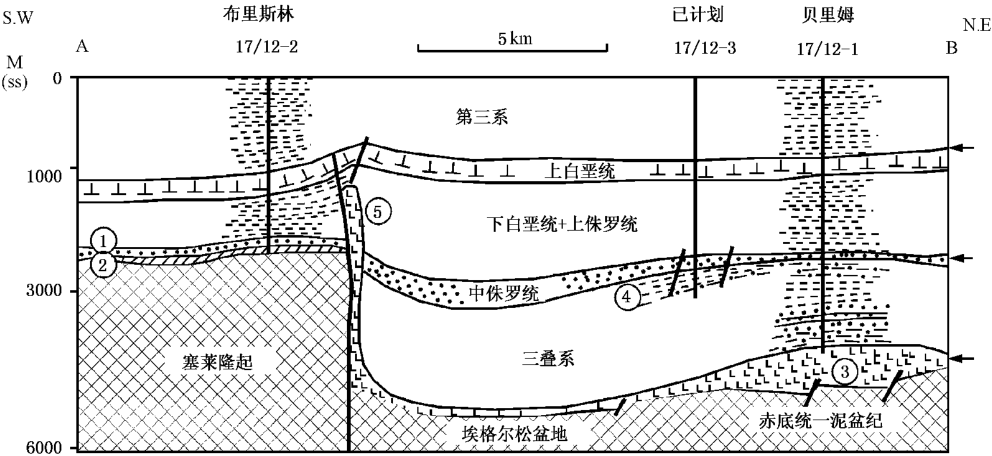


图7—58 贝里姆至布里斯林地震地质剖面

(1)侏罗系砂岩和粉砂岩；(2)上三叠统碳酸盐岩；(3)上二叠岩盐层；(4)下侏罗统；(5)塞莱隆起的边界断层

B. T. —第三纪底界；B. K_L—下白垩统底界；B. C. —卡洛夫阶底界；

B. K_u—上白垩统底界；B. V. —伏尔加阶底界；B. Z. —蔡希斯坦统底界

贝里姆构造为近圆形，为盐岩层上拱形成的背斜，圈闭面积为 80km²，相应的闭合高度约为 140m，在该穹隆的西翼局部见有小型正断层（图 7—59）。

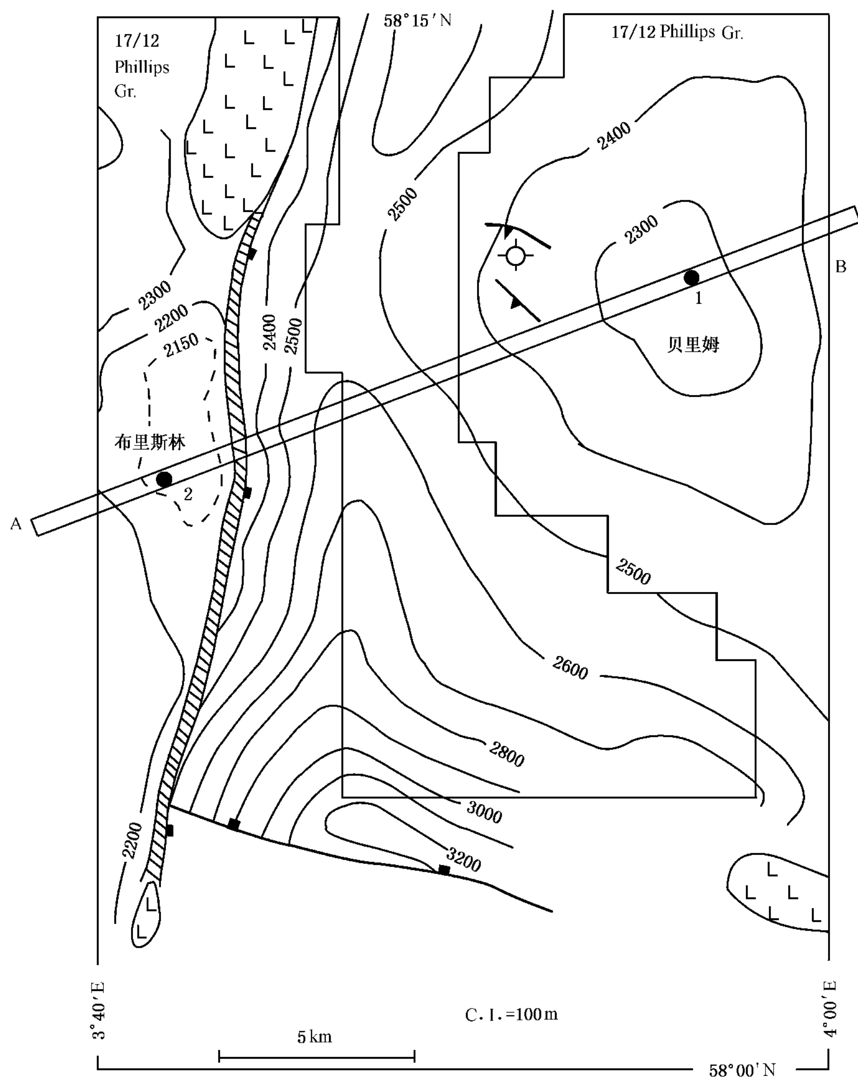


图 7—59　贝里姆及布里斯林构造图（单位：m）

布里斯林构造为北—南向的背斜，宽 6km，长 10km。在其东翼被一平行于轴向的主要断层切割。这条断层恰是塞莱隆起和埃格桑亚盆地之间的分界线，是油藏构造东界的标志。闭合高度约为 130m，圈闭面积为 40km²。

两个构造的储集层之上，都覆有上侏罗统及下白垩统的粘土岩，厚度为 700～1000m，尽管盖层厚度大，但这两构造都没有充满油气。这可能是因为该区生成的原油，数量太少，运移不畅等多种因素造成的结果，但目前尚说不清楚。

布林组（巴柔阶至巴通阶）和桑内斯组（卡洛夫阶），是本区主要的储集层。在塞莱隆起，布林组主要由粉砂岩组成，含厚度小于 5m 的多孔砂岩，在盆地中它含有 170m 的河流—三角洲砂岩、粉砂岩、碳质页岩以及煤层。在贝里姆构造上该组 50％的层段具储集潜能。不过，在贝里姆和布里斯林两地，布林组都处于油/水界面之下。

桑内斯组由海侵(海岸的)海绿石砂岩与黑色页岩的互层组成,它相当于中央地堑的尤拉组。在贝里姆地区,桑内斯组的厚度达 27~56m,它由 3 个砂质单元组成,上部单元致密,而下面两个单元在 17/12-1 井平均孔隙率为 19%和 24%,最大的含油层厚度不超过 15m。对两个多孔砂岩单元的联合试井,通过 8/64in 油嘴,日流量为 160m^3。在布里斯林该组以 13m 厚的砂岩单元为代表,孔隙率 20%,由于储层中油/水界面变浅,因而纯含油层厚度仅有 7m 了。

贝里姆和布里斯林被认为早期成熟的、非生物降解的石油,硫含量从贝里姆为 0.41%(重量百分比)变到布里斯林的 1.14%,钻井中回收样品的沥青质含量为 1.5%(重量百分比)。该两个构造中的原油储量尚未公布,挪威石油董事会 1980 年年报将这两个油田归到$\leqslant 1\times 10^6 m^3$ 原油这一档,对于贝里姆油田来说这或许是悲观的。

十四、科德(Cod)油气田

科德为天然气—凝析油型油气田,位于挪威与英国界线以东 1km 挪威的 7/11 区块内,距东北部的斯塔旺格市 285km,该处水深 70m。该油气田于 1965 年经地震普查在 7/8 和 7/11 区块识别出 3 个雁列式构造。1967 年,将南部的构造分为两个明显的远景区,称作科德和东北科德。1968 年在科德构造顶部打了第一口探井(7/11-1),在 2845~3025m 间钻遇了古新统含天然气的砂页岩互层层序,该层段上部称作“科德砂岩”,为厚度达 52m 的储集层,其中最好的一段储集层厚 23m,经测试日产 $1.3\times 10^6 m^3$ 天然气及一些凝析油。该井即科德油气田的发现井。在古新统砂岩以下,钻遇了 650m 下古新统及上白垩统的白垩层,数米厚侏罗系黑色页岩和三叠系白色硬石膏,以及 250m 的蔡希斯坦的岩盐。该井在海底以下 3885m 处完井,没有钻达赤底统。

在发现井打完之后,于 1968 年年中在其东 1.8km 处,该构造的东翼打了 7/11-2 井,该井在古新统中亦发现良好含气储集层,储集层纯厚度及产率类似于发现井。1968 年底在发现井西南 3km 处构造低部位钻了 7/11-3 井,于 3060m 处发现大多数储集砂岩的质量变差,油水界面距储集层顶部仅 3m,经测试在这 3m 砂岩中,日产 3400m^3 天然气,14m^3 石油及 53m^3 水,这表明在天然气之下有石油。

1969 年钻于东北科德构造上的 7/11-4 井,仅在古新统中发现少量薄砂岩层,总厚小于 9m,没有油气。因该地区已施工钻井没有在中生代地层中发现油气,故该井钻于白垩系地层后停钻。

根据勘探/评价井初步预计原始天然气储量为 $28\times 10^9 m^3$。在重新作了构造解释(图 7-60)之后,于 1975 年安装了一个 9 槽钻井/开发平台。

1977 年冬天科德油气田开始生产,高峰时日产天然气达 $3.3\times 10^6 m^3$(1980 年),以后逐年减产到日产量 $1.7\times 10^6 m^3$ 天然气及 270m^3 凝析油,到 1986 年为止,总产量为 $6.0\times 10^9 m^3$ 的天然气和 $2.2\times 10^6 m^3$ 的凝析油。

科德油气田靠近北部北海第三纪中央海槽,第三系厚度超过 3500m。科德油气田钻遇的最老岩层是二叠系蔡希斯坦统盐岩。由于启莫里阶运动,使部分三叠系地层及中下侏罗统地层全部被剥蚀掉。上侏罗统启莫里阶 40m 厚的海相砂岩和页岩直覆于三叠系岩层之上。

这个砂质层段之上为 120m 黑至灰黑色的曼达尔组页岩,该页岩为科德油气田的源岩,在晚侏罗世和早白垩世时,科德位于韦斯特兰背斜和中央地堑之间。在 7/11-7(Ab)井,下白垩统由 85m 的克罗默诺尔群钙质页岩和灰岩组成。上白垩统及古新世几乎全为白垩层,厚达 920m。

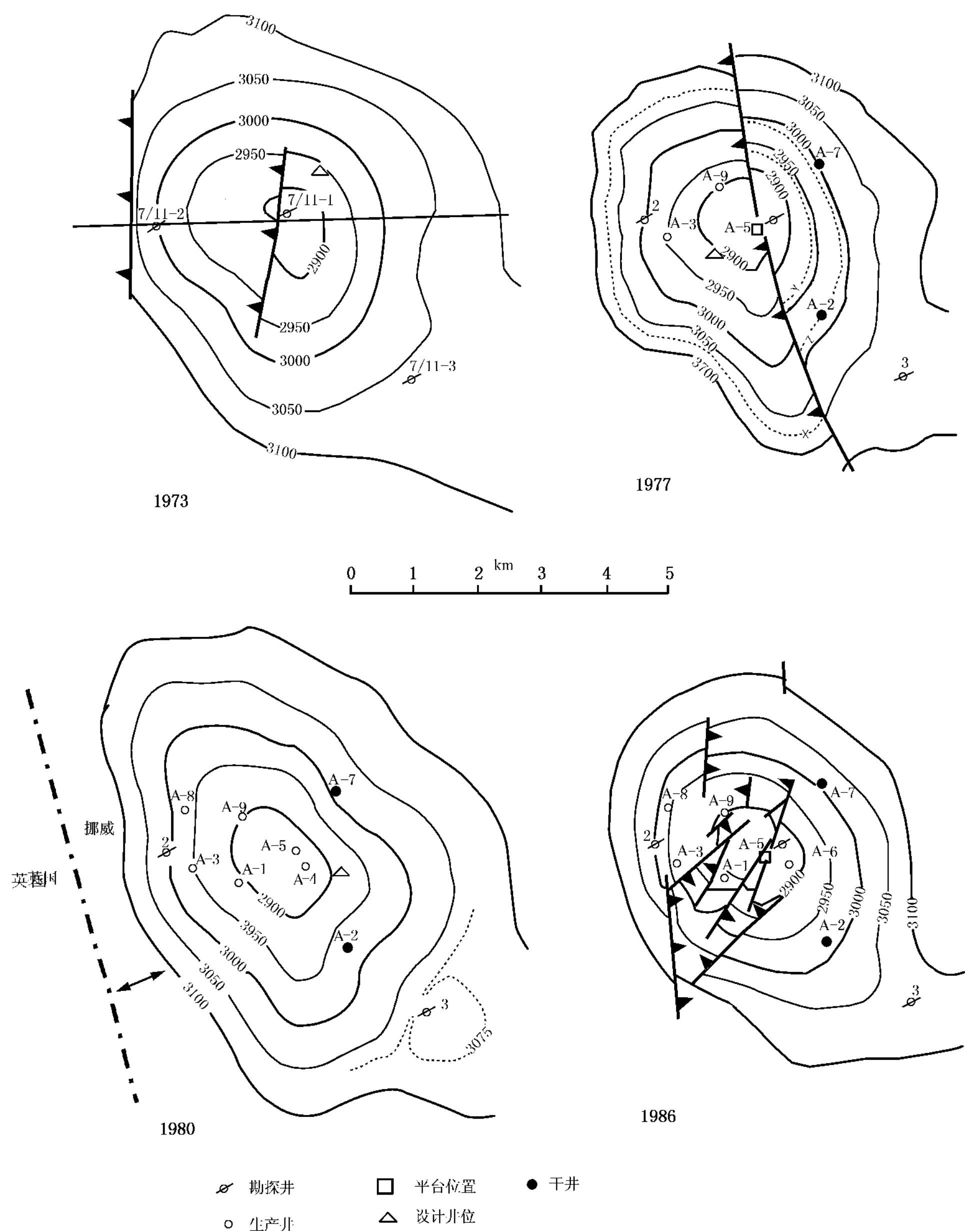


图 7—60 根据科德油气田各类钻井资料所作的构造解释

（等值线不包括海水深，单位为米）

科德油气田的储集岩为中、晚古新世蒙特罗斯群，储集层之上覆盖了厚约 3000m 的粘土岩及页岩，属第三纪晚期沉积。

科德是一个位于盐岩穿刺之上的穹隆构造，外形近于圆形。储集岩出现在 2870m 处，垂向闭合超过 200m，属构造—地层圈闭。

科德油气田的储集层（主科德砂岩）变化大，对比较困难，大多为透镜状砂体，向北东方向变薄转化为泥岩而尖灭。朝南东方向钙质胶结物增多并存在着断层封闭的特征。“主科德砂岩”的孔隙率一般在 15％～24％之间，渗透率在（15～100）$\times 10^{-3}\ \mu m^2$ 之间变化。

科德油气田中不同的井,其气—水界面的出现深度不同,其高低相差达170m。经测试"主科德砂岩"日产能力一般为$1.1\times10^6m^3$天然气和$240\sim310m^3$的凝析油($0.76g/cm^3$),有的探井在"主科德砂岩"底部10m层段中有石油流出,密度为0.86,这个含油带向下一直延伸至2920m,而在有的井中气带就扩展到3080m。

科德油气田原始可采储量为$7.5\times10^9m^3$的天然气和$2.7\times10^6m^3$的凝析油,到1986年底已采出总可采储量的81%。

第三节　丹麦所辖海域油气勘探及油气田概况

丹麦在北部北海盆地所占海域面积比它本土面积要大些,大约有$5.6\times10^4km^2$,但由于其所处构造部位不太有利,因而虽经多年勘探,在海上找到的油气田很少且小。

丹麦所辖海域的主要构造概貌表示于图7—61中,可以看出NWW—SEE走向的林克宾芬隆起占据了其海域的主要部分。该隆起把北西德意志盆地与挪威—丹麦盆地分开;该隆起向西延伸被中央海槽(实为中央地堑的组成部分而在丹麦段被称为中央海槽)所分割,与英国海域称为中北海隆起相对;向东隆起插入丹麦陆地,该隆起还被南北向的霍思地堑和布兰讷海槽分割成不等的3段。在这样的构造背景下,因而其在北海油气勘探首先集中于中央海槽(即中央地堑的一部分)及其周围是非常自然的,根据目前能收集到的资料也只能对丹麦中央海槽部分的油气勘探情况及其已证实的油气田作可能的概述。

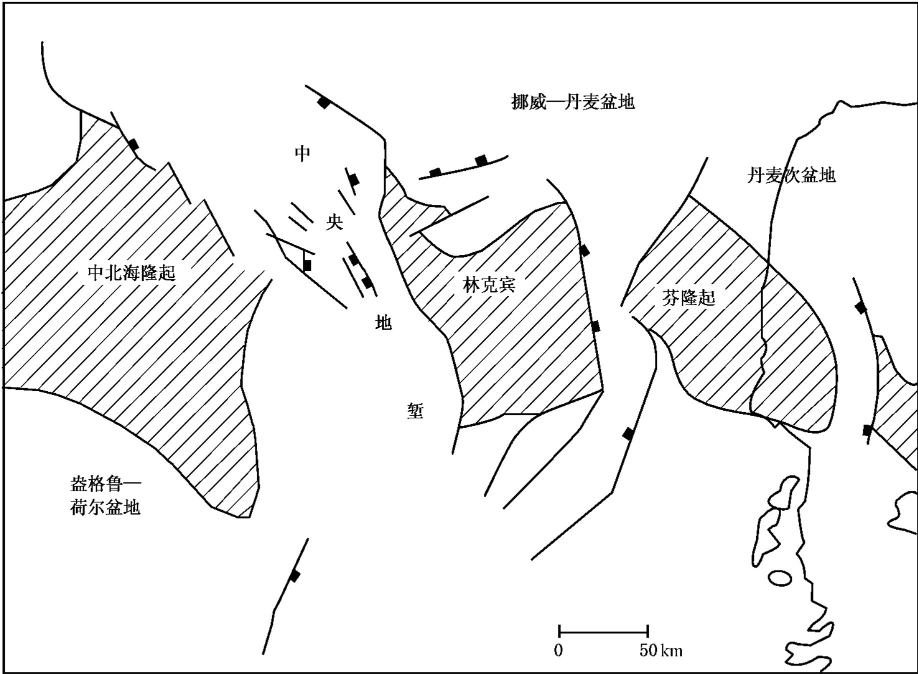


图7—61　北海丹麦海域中的主要区域构造轮廓

丹麦中央海槽位于丹麦所辖北海海域的最西部,距陆地日德兰半岛大约250km,它北、西、南以海上划分边界分别与挪威、英国、德国所辖海域相接,东部边界由大的北西—南东向断裂系统(实为中央地堑的边界断裂的一部分)与林克宾芬隆起相邻(图7—61)。该区面积仅占

丹麦所辖北海海域面积的十分之一强些，约为 6500km^2，水深由南部的 30m 左右，向北逐渐加深至 70m 左右。

丹麦中央海槽是一个复杂的断陷盆地，它具有漫长的差异沉降历史，主要的断陷作用发生于中生代时期，在该区 Tail End 地堑中侏罗系沉积厚达 4km，成为侏罗纪时期北部北海的主要沉积中心。到晚白垩世，差异沉降结束，由张性盆地转变为压扭性盆地，出现了达宁阶—上白垩统的区域性白垩沉积，到第三纪时中央海槽已成为一个单一的盆地。

丹麦中央海槽及其周围于 1966 年 8 月由 DUC（丹麦地下国际财团）钻了第一口海上探井，在达宁阶白垩中发现油气显示，它也是首先证明北部北海有油气的第一口井。依据这个发现，以后的勘探自然直接针对达宁阶—上白垩统的白垩构造。于 1971 年 5 月在 Abby 构造的 M—1 井钻遇油气，这个发现即后来命名为丹（Dan）油田。同年，在丹油田西北 N—1 井的白垩层中又钻遇石油，即后来称作格罗姆（Gorm）的油田。后来于丹油田北部的巨大低起伏白垩构造钻井中也试出少量石油和天然气，但不具商业价值。经过几年勘探，于 20 世纪 80 年代初又发现了提拉（Tyra）油气田，于 1984 年投入生产，但具体资料不祥。另外，还有两个主要发现，即 1982 年投入生产的斯科胶尔德（Skjold）油田和于 1986 年投入生产的洛尔夫（Rolf）油田，它们都是盐刺穿形成的构造，在其顶部都有白垩储集层，有的单井初产还较高，如斯科胶尔德油田，初期投入生产单井产量可达 15000BOPD。还有 9 个有商业意义的发现区，它们是罗尔（Roar）、科拉卡（Kraka）（由 A—1 发现）、伊格尔（Igor），北奥尔内（Arne）、阿达（Adda）、尼尔斯（Nils），Bo/北尖斯（North Jens）、包街（Boje）和东罗沙（East Rosa）。由于缺乏资料，对其具体情况无法叙述，不过，从已有的发现看，除北奥尔内外，所有具商业意义的发现区都位于丹麦中央海槽的南部（图 7—62）。

根据丹麦工程机构 1986 年的报导，该区油气田的总保有储量约为 $16.2\times10^6 m^3$ 原油和 $49.3\times10^9 m^3$ 的天然气。1985 年日平均产量达 10000m^3 原油和 $3\times10^6 m^3$ 天然气，它们在格罗姆和提拉油田分别处理后，用管道输至丹麦本土岸边炼油厂加工。所采的原油大多属轻质油，API 一般为 30°～38°，储集层大多数为达宁阶—马斯特里赫特阶的白垩层，可以说凡是钻遇该段白垩层的钻井都会有油气。经丹麦工程机构 1986 年预测白垩层中的保有原始储量可达 $132\times10^6 t$ 石油当量，当然，这个数量与挪威埃科菲斯克地区的白垩油田储量相比是相当小的。

丹麦中央海槽及其周围的白垩层沉积形成的圈闭类型有以下几种。

（1）由下伏地层盐运动形成的圈闭类型。这是该区最重要的一种圈闭类型。如丹、格罗姆和科拉卡油田均属此种圈闭。由于是同生构造圈闭，因而其裂隙很少见，岩石渗透性差，一般 $<10\times10^{-3}\mu m^2$，孔隙度由圈闭顶部向边缘逐渐减小。

（2）由盐刺穿构造形成的圈闭。它们一般是晚白垩世—早第三纪发育的，裂隙发育较好，储集层质量在侧向上变化很大，说明其成岩历史复杂，斯科胶尔德、洛尔夫油田及东罗沙、尼尔斯、北奥尔内等发现区均属此类，虽然这些圈闭（斯科胶尔德除外）比丹和格罗姆油田小得多，但因它们裂隙发育，单井产出率都较高，值得提及的是到目前斯科胶尔德油田的生产还仅在一口井中进行。

（3）罗尔、提拉和伊格尔气田属宽阔的背斜圈闭类型，背斜非常平缓，裂隙不发育，渗透率也低，储集层仍以达宁阶白垩层为主。

（4）构造—地层圈闭类型，阿达发现区是惟一的这种类型。

据零星报导，在丹麦中央海槽中钻遇上侏罗统储集层的 W—1 井，Q—1 井，B—1 井（图 7—62）都有一些发现，但未见具体资料叙述，仅告知应重视对上侏罗统储集层的勘探。钻遇中

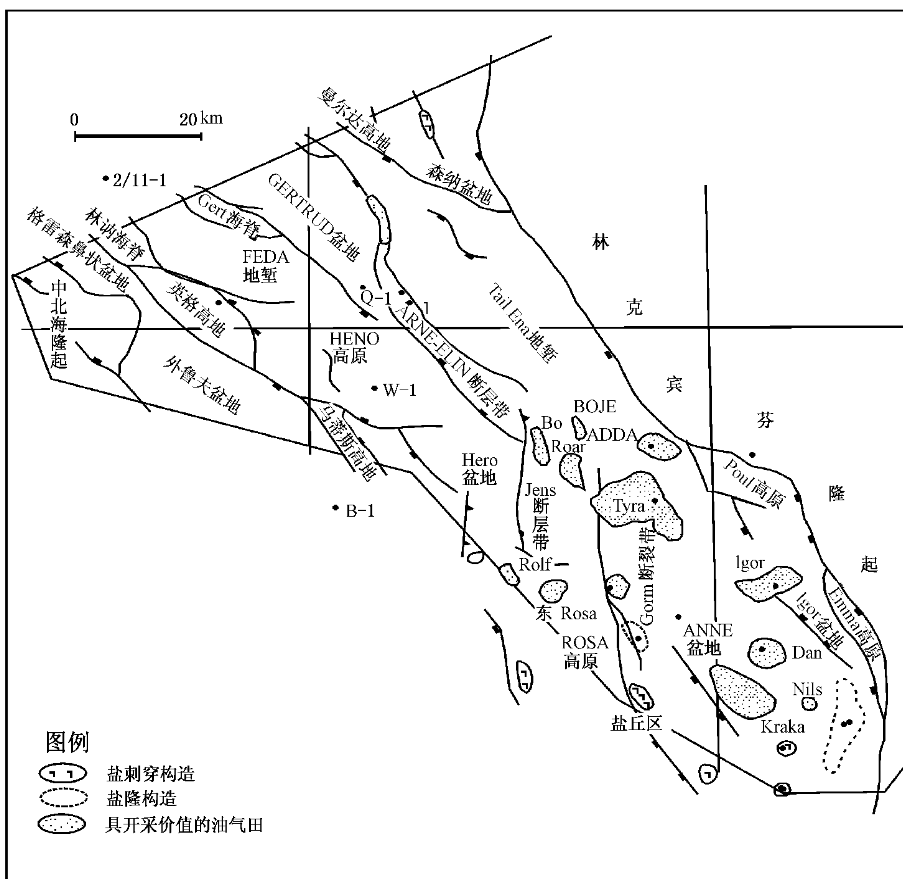


图 7—62　丹麦中央海槽部分构造轮廓及油气田位置图

侏罗统的 A—2 井、M—8 井、O—1 井、U—1 井和 Lulu—1 井，都打到厚度 5～50m 的纯砂岩，除 O—1 井为干井外，其他井中在中侏罗统储集层都证实有不同程度的油气显示，特别是 Lulu—1 井在中侏罗统砂岩中见有大量油气，但对其具体评价如何，却不见下文。在该区钻遇古生代储集层的井有 P—1 井，D—1 井。赤底统砂岩的孔隙性和渗透性都很好，但对其油气情况却只字不提。

已有资料表明，丹麦中央海槽的达宁阶—上白垩统白垩层的勘探，已达相当成熟的水平（图 7—63），发现的大多数圈闭均已进行了钻井验证以及地震地层学和沉积学的分析研究，认为在白垩层中进行油气勘探具有很大的风险性，因而其收益也较差。

一、丹(Dan)油田

发现于 1971 年 5 月，1972 年投入生产。为近穹隆状盐隆构造，圈闭面积约 $80km^2$，地震资料说明是晚侏罗世开始持续到早第三纪盐运动形成的背斜构造。储集层为裂隙发育的达宁阶—上白垩统的白垩层，但以马斯特里希特阶裂隙最发育，是良好含油层，油层平均厚 50m 左右，平均孔隙度 28%，渗透率 $0.5\times10^{-3}\mu m^2$，在已钻井中遇到油水界面高低不一，可能是由于受孔隙度变化引起的毛细管压力不同形成的结果。该油田的地震剖面如图 7—64 所示，该油田原始保有储量加上格罗姆油田的原始储量占了目前投产油气田的总保有储量的一半以上，约为 $33\times10^6m^3$ 石油和 $12\times10^9m^3$ 的天然气。

0 10 20km

NARNE
BO
BOJE
ADDA
POAR
TYRA
ROLF
GORM
E.ROSA
SKJOLD
DAN
NILS
KRAKA

图 例

白垩顶部闭合构造
白垩底部闭合构造
巴列姆阶闭合构造
主气区
主油区
发现凝析气
发现油
油显示
干或无主要显示
1982—1986钻探区
未钻探区

图 7—63 丹麦中央海区达宁阶—上白垩统白垩类型油气田勘探远景图

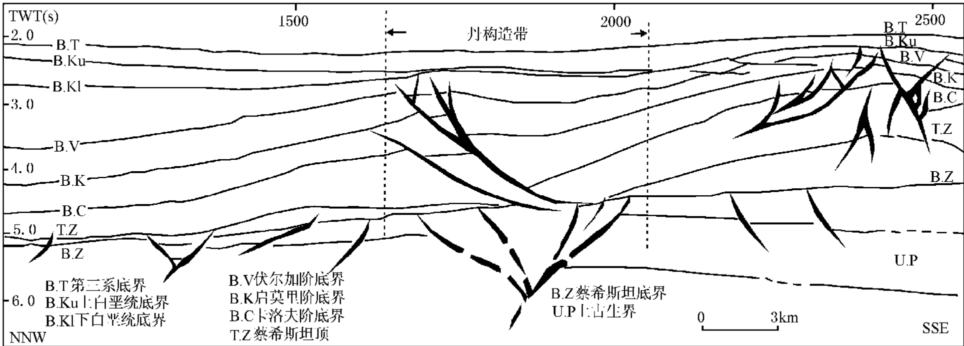


图 7—64 丹构造地震解释横剖面图

二、格罗姆(Gorm)油田

该油田比丹油田发现稍晚些,但亦在1971年内,可开始生产时间却在1982年。为一近椭圆形的由盐运动形成的背斜,长轴4.5km,短轴为3km,其圈闭面积为38km^2。它是丹麦在北海区投产的第二个油田。储集层为达宁阶的白垩层,以上部储集条件较好,向下变致密、间夹有较好储集层段。其原始油气储量是与丹油田在一起报导的,难于具体划分出其数量的多少。

三、阿达(Adda)油气田

它是丹麦中央海槽内目前发现的惟一属构造—地层圈闭类型的油气田,构造长轴为6km,短轴3.5km,闭合面积约65km^2,其储集层为上白垩统土伦阶和下白垩统巴列姆阶,由灰岩和白垩层序组成。储集层主要为白垩层序,经测试每天约产凝析油500bbl,天然气$2.8\times10^6 ft^3$,该储集层与达宁阶—上白垩统的白垩储集层比起来更致密些,其孔渗条件也较差些,一般孔隙度<25%,渗透率$<1\times10^{-3}\mu m^2$。土伦阶白垩储集层测试结果是,每天可产3500bbl的原油,孔隙、渗透条件比巴列姆储层稍好些,多孔隙性白垩层较发育。其地震解释剖面如图7—65所示。

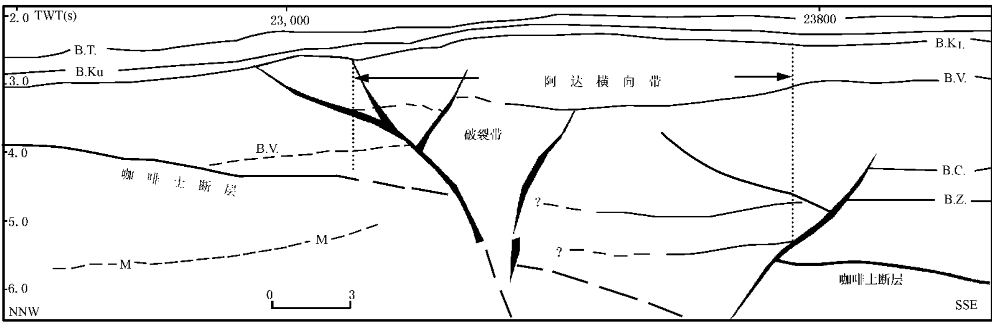


图7—65　阿达构造地震解释横剖面图

BT—第三系底界;B.KL—下白垩统底界;B.C—卡洛夫阶低界;
B.KU—上白垩统底界;B.V.—伏尔加阶底界;B.Z—蔡希斯坦统底界
1—侏罗系砂岩和分砂岩;2—上三叠统碳酸盐岩;3—上二叠统盐;
4—下侏罗统盐刺穿;5—塞莱高地的边界断层

虽然在丹麦中央海槽中,已发现具有商业意义的油气田有14个(详见图7—62),但由于对该区的报导多比较笼统,而且又是综合在一起叙述的,因而对其每个油气田情况限于资料无法作更详细的叙述了。

参考文献

Armstrong L A, *et al*. 1987. The geology of the Gannet fields of Central North Sea, UK Sector. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 533～548

Bifani R, *et al*. 1987. Geological and reservoir characteristics of the Retligend Sandstones in the Argyll field. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 509～552

Cartwright J A. 1987. Transverse structural zones in continental rifts—an example from the Danish sector of the North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 441～452

Cooper B S and Barnard P C. 1984. Source rocks and oils of the central and northern North Sea. Petro. geoch. and basin evaluation. 303～314

Cloetingh S, *et al*. 1987. Apparent sea level fluctuations and a paleostress field for the North Sea region. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 50～56

Cayley G T. 1987. Hydrocarbon migration in the central North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 549～555

Duindam P and Hoom B. 1986. Structural evolution of the West Shetland continental margin. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 764～773

Doligez B, *et al*. 1987. Numerical modelling of sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in the Viking Graben North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 1039～1048

Dahl B, *et al*. 1987. Oseberg area integrated basin modelling. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 1029～1038

Damtoft K, *et al*. 1987. Prospectivity and hydrocarbon plays of the Danish Central Trough. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 430～417

Eriksen T, *et al*. 1987. Gullfaks. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 273～286

Engelsted E. 1987. Murchison. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 295～306

Frost R F. 1987. The evolution of the Viking Graben tilted fault block structures. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 1009～1024

Frandsen N, *et al*. 1987. A dynamic geological model of the Danish Central Trough during the Jurassic—Early Cretaceous. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 453～467

Glennie K W. 1986. Introduction to the petroleum geology of the North Sea. London. 1～263

Goff J C. 1984. Hydrocarbon generation and migration from Jurassic source rocks in the East Shetland Basin and Viking Graben of the northern North Sea. Petro Geoch and Basin Evaluation. 273～301

Gibbs A D. 1987. Deep seismic profiles in the northern North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 1025～1028

Gray D I. 1987. Troll. Geology of the Norwegian oil and gas fields. 389～402

Garroussi K A, *et al*. 1987. Complex diagenesis in Zechzton donomites of the Ettrick oil field. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 577～589

Hamar G P, *et al*. 1985. Tectonic framework of the more Basin and northern North Sea. Petroleum geology of the North European margin. 349～358

Hamilton P J, *et al*. 1987. Isotopic tracing of the provenance and diagenesis of Lower Breant GroupSands North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 939～949

Heur M D. 1987. Cod. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 51～62

Heur M D. 1987. Tor. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 129～142

Johnson H D, *et al*. 1985. Role of clastic sedimentology in the exploration and production of oil and gas in the North Sea. Sedimentology: recent developments and applied aspects. 249～310

Johnson H D, *et al*. 1987. Alwyn north field and its regional geological context. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 963～977

Jensen T F, *et al*. 1987. Sedimentology and geochemistry of the organic carbon. North Sea petroleum geochemistry and basin evaluation. 303～314

Kleppe J, *et al*. 1985. North Sea oil and gas reservoirs. Graham & Trotman. 1～352

Kennedy W J. 1987. Sedimentology of Late Cretaceous－Paleocene chalk reservoirs North Sea Central Graben. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 469～480

Lingdgreen H. 1987. Molecular sieving and primary migration in Upper Jurassic and Cambrian claystone source rocks. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 357～364

Leonard R C. 1987. Velhall. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 153～164

Mudge D C and Rashid B. 1986. The geology of the Faeroe Basin area. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 751～763

Mackenzie A S, *et al*. 1987. The expulsion of petroleum from Kimmeridge clay source rocks in the area of the Brae oil field UK continental shelf. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 865～877

Maber C E, *et al*. 1987. Claymore oil field. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 835～864

Nelson P H H and Lamy J M. 1987. The M≪re/ west Shetlands area: a review. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 775～784

Norbury L. 1987. Hod. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 107～116

Nordgard Boles H M. 1987. Odin. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 235～242

Nipen O. 1987. Oseberg. Geology of the Norwegian oil and gas fields. Graham & Trotman. 379～388

Olsen J C. 1987. Tectonic evolution of the North Sea region. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 390～401

Owen R J, *et al*. 1987. Regional interval velocity maps of UK northern North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 997～1007

Ostfeldt P. 1987. Oil－source rock correlation in the Danish North Sea. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 419～429

Ray Dafter. 2003. Plenty of life left in the North Sea. Oil & Gas Journal, 51～54

Stow D A V, *et al*. 1987. Sediment facies and geochemistry of Upper Jurassic mudstones in the central North Sea area. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 2. 797～808

Stemmerik L, *et al*. 1987. The Zechstein carbonates of southern Jylland Denmark. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 365～374

Spencer A M, *et al*. 1985. Habitat of hydrocarbon on the Norwegian continental shelf. Graham & Trotman, 1～354

Smith R L. 1987. The structural development of the Clyde field. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 526～531

Taylor S R, *et al*. 1987. North Sea chalk diagenesis and its effect on reservoir location and properties. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 483～495

Thone J A, *et al*. 1989. Quantitive analysis of North Sea subsidence. AAPG, No. 1, 89～116
Thomsen E, *et al*. 1987. Hydrocarbon plays in Denmark outside the Central Trough. In: Brooks J and Glennie K W (ed.). Petroleum geology of northwestern Europe, Vol. 1. 375～388